

TRACȚIUNE ELECTRICĂ

**UNIVERSITATEA ORADEA**

**Facultatea de Inginerie Electrica si**

**Tehnologia Informatiei**

**Prof.univ.dr.ing.OVIDIU POPOVICI**

**TRACȚIUNE ELECTRICĂ**

**2008**

**Toate drepturile asupra acestei lucrari apartin autorului**

## Cuvânt înainte

În contextul economic mondial, în care criza energetică se adâncește tot mai mult, iar poluarea și încălzirea globală devin prioritatea numărul unu pentru noi toți, utilizarea vehiculelor cu tracțiune electrică poate reprezenta o soluție viabilă la aceste probleme. Lucrarea de față, prezintă tracțiunea electrică într-un cadru unitar, începând cu bazele dinamicii vehiculelor electromotoare, continuând cu sisteme de sustentație și ghidare ale acestora și continuând cu vehiculele electromotoare utilizate în tracțiunea electrică, automobilul electric și vehiculele electrice hibride. În final se fac referiri la compatibilitatea electromagnetică în tracțiunea electrică iar în anexe, se exemplifică ultimele realizări în domeniu.

Suntem încredințați, că această carte va trezi interesul studenților de la inginerie electrică și sperăm să fie utilă inginerilor și specialiștilor care lucrează în tracțiunea electrică.

Dorim să aducem mulțumirile noastre Dlui Prof.univ.dr.ing. Vasile Iancu de la Universitatea Tehnică Cluj Napoca și colaboratorilor săi, pentru activitatea de coordonare a acestei lucrări . Totodată ne exprimăm recunoștința față de colegii din cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Tehnologia Informației din cadrul Universității Oradea.

Autorul

**CUPRINS**

<b>1. TRACȚIUNEA ELECTRICĂ, PROBLEME GENERALE</b>	<b>9</b>
1.1. Clasificări	10
1.2. Istoric privind tracțiunea electrică	12
1.3. Tracțiunea electrică în România	17
1.4. Structura generală a unui sistem de tracțiune electrică (STE)	26
1.4.1. STE cu VEM neautonome	26
1.4.2. STE cu VEM autonome	32
<b>2. BAZELE DINAMICII VEM</b>	<b>35</b>
2.1. Ecuațiile și stabilitatea mișcării utile a VEM	36
2.2. Ciclurile de deplasare utilă și diagramele de mers ale VEM	43
2.3. Forța de tracțiune în cazul VEM propulsate cu motoare electrice rotative	47
2.4. Forța de tracțiune în cazul VEM propulsate cu motoare electrice liniare	58
2.5. Forțele de frânare la VEM	66
2.6. Forțele de rezistență la înaintare a VEM	69
<b>3. INSTALAȚII FIXE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ</b>	<b>75</b>

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

3.1. Substații de tracțiune electrică (SSTE)	77
3.1.1. SSTE de curent continuu	78
3.1.2. SSTE de curent alternativ monofazat	88
3.2. Fideri de alimentare (FA) și de întoarcere (FÎ). Returul curentului electric	98
3.3. Linia de contact (LC)	102
3.3.1. Suspensia de contact și instalațiile de susținere	103
3.3.2. Șina de contact și instalația de susținere	112
3.3.3. Influențe electromagnetice ale LC	114
3.4. Posturi de secționare, subsecționare și de punere în paralel	120
 <b>4. SISTEMELE DE SUSTENTAȚIE, GHIDARE ȘI TRANSMISIE SPECIFICE VEM</b>	 125
4.1. Sisteme de transmisie la VEM propulsate cu motoare electrice rotative	126
4.2. Sisteme de sustentație și ghidare la VEM propulsate cu motoare electrice liniare	134
4.2.1. Sisteme de sustentație și ghidare clasice	135
4.2.2. Sisteme de sustentație și ghidare cu pernă de aer	138
4.2.3. Sisteme de sustentație și ghidare cu pernă magnetică	142
 <b>5. VEM ALIMENTATE ÎN CURENT CONTINUU (VEMC)</b>	 161
5.1. VEMC propulsate cu mașini de tracțiune de c.c. serie	166
5.1.1. Specificul mașinilor de tracțiune	166

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

5.1.2. Funcționarea în regim de tracțiune	170
5.1.3. Funcționarea în regim de frânare electrică	192
5.2. VEMC propulsate cu mașini de tracțiune asincrone trifazate	215
5.2.1. Invertoare trifazate de putere folosite pentru legarea mașinilor de tracțiune la linia de contact de c.c.	216
5.2.2. Funcționarea în regimurile de tracțiune și de frânare electrică	227
<b>6. VEM ALIMENTATE ÎN CURENT ALTERNATIV (VEMA)</b>	<b>245</b>
6.1. VEMA propulsate cu mașini de tracțiune de c.c. serie	246
6.1.1. Regimul de tracțiune	249
6.1.2. Regimul de frânare electrică	260
6.2. VEMA propulsate cu mașini de tracțiune asincrone trifazate	264
6.2.1. Reglarea vitezei mașinilor de tracțiune	265
<b>7. TRACȚIUNEA ELECTRICĂ PRIN CABLU</b>	<b>271</b>
<b>8. VEHICULE ELECTROMOTOARE AUTONOME</b>	<b>281</b>
8.1. Locomotive diesel-electrice	282
8.1.1. Locomotive diesel-electrice de c.c.	283
8.1.2. Locomotive diesel-electrice de c.a.- c.c.	290
8.1.3. Locomotive diesel-electrice de c.a.	295
8.2. Electromobile	297
8.3. Vehicule electrice hibride VEH	308

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

8.3.1.Introducere	308
8.3.2.Vehicule electrice și vehicule electrice hibride	315
8.3.3.Vehicule hibride complet electrice	319
8.3.4. Clasificarea vehiculelor electrice hibride	323
8.3.5. Probleme de mediu și piața de desfacere a VEH	328
8.3.6. Funcționarea vehiculelor electrice hibride VEH	333
8.3.7. Criterii de clasificare a vehiculelor electrice hibride	345
8.3.8. Baterii, pile de combustie și supercondensatoare utilizate pe vehicule electrice hibride.	350
8.3.9. Motoare electrice, pentru propulsia VEH	394
<b>9. PERTURBAȚII ELECTROMAGNETICE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ</b>	<b>421</b>
9.1.Introducere	422
9.2.Perturbații electromagnetice ale VEM	424
9.3.Perturbații electromagnetice ale instalațiilor fixe din STE	435
9.4.Norme și standarde în STE	460
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>475</b>
<b>ANEXE</b>	<b>485</b>

## **CAPITOLUL 1**

# **TRACȚIUNEA ELECTRICĂ, PROBLEME GENERALE**



## 1.1. CLASIFICĂRI

Tracțiunea se definește ca exercitarea de către un organ de propulsie a unei forțe asupra unui vehicul în scopul deplasării acestuia pe o cale de circulație. În cazul specific al tracțiunii electrice, organul de propulsie este realizat cu motoare electrice rotative sau liniare, iar forța de tracțiune aplicată vehiculului se dezvoltă ca urmare a unor acțiuni în câmp electromagnetic.

Vehiculul electric se numește motor, dacă forța de tracțiune se obține cu echipamente aflate pe vehicul, fiind datorată interacțiunii,

- prin contact mecanic, între vehicul și calea de circulație (sau de rulare), vehicule cu aderență la cale, propulsate cu motoare electrice rotative,

- fără contact între vehicul și calea de circulație (sau de zbor) vehicule pe pernă de aer sau magnetică, propulsate cu motoare electrice liniare.

În cazul vehiculului electric pasiv, forța de tracțiune se obține în esență, cu mijloace exterioare vehiculului, fiind dezvoltată fie de motoare electrice rotative și transmisă vehiculului prin cablu, fie de motoare electrice liniare, având armătura activă fixată în cale, iar cea pasivă solidară cu vehiculul.

Vehiculele electrice motoare, pe care le vom numi (VEM) se pot clasifica după mai multe criterii. Astfel, după modul de alimentare cu energie electrică, se deosebesc:

- VEM autonome, adică alimentate de la surse electrice proprii (grup diesel-generator, baterii de acumulare, pile de combustie etc.) plasate pe vehicul; din această clasă de VEM fac parte locomotivele diesel-electrice, locomotivele de mină cu acumulare și electromobilele (autoturisme electrice, electrobuze, electrouutilitare,

electrocare etc.)

– VEM neautonome, adică alimentate, prin intermediul unei linii de contact, de la surse electrice exterioare (substații de tracțiune electrică); din această clasă de VEM fac parte locomotivele electrice, tramvaiele, troleibuzele, metrourele și VEM pe pernă de aer sau magnetică.

După natura căii de circulație, se pot clasifica în:

– VEM pe cale ghidată, convențională (ferată) sau neconvențională (monorai, suspendată, cu șină-cremalieră etc.); acestei clase de VEM îi aparțin locomotivele electrice feroviare și miniere, locomotivele diesel-electrice, tramvaiele, metrourele și VEM cu pernă de aer sau magnetică.

– VEM pe cale neghidată (carosabil); acestei clase de VEM îi aparțin troleibuzele și electromobilele.

Pentru subclasa de VEM destinate exclusiv transportului de călători pe cale ghidată se folosesc următoarele denumiri specifice:

- vagon-motor electric, definind VEM care conține pe lângă echipament energetic și spații pentru călători;

- secție (sau unitate) de tracțiune electrică, constituind cel mai mic ansamblu de tracțiune electrică, autonom și indivizibil în exploatare, format, de obicei, dintr-un vagon-motor electric și un vagon-remorcă;

- ramă electrică, reprezentând ansamblul de secții de tracțiune electrică (eventual, vagoane-motoare electrice) în compunere fixă și reversibilă din punct de vedere al circulației pe calea ghidată (adică, având cabine de conducere la ambele capete ale VEM);

- tren electric automotor, definind ansamblul reversibil

format prin gruparea mai multor rame electrice.

Totodata, la toate tipurile de VBM trebuie rezolvate încă două probleme de bază: *sustentația (sau susținerea) și ghidarea* vehiculului, adică echilibrul stabil al acestuia în direcție verticală, respectiv orizontală, față de calea de circulație. Astfel, la VEM cu aderență la calea ghidată sustentația și ghidarea sunt asigurate integrat de sistemul roată-șină, iar la VEM cu aderență la calea neghidată sustentația se realizează, în esență, prin roți pneumatice pe suport de rulare nemetalic (carosabil), iar ghidarea pe cale se asigură utilizând o parte din roțile de sustentație asociate cu "mecanisme de direcție". În sfârșit, la VEM propulsate cu motoare liniare sustentația și ghidarea se realizează, convențional, cu roți metalice sau de cauciuc pe suport de rulare și, neconvențional, cu pernă de aer (cu presiune sau cu depresiune), respectiv cu pernă magnetică, prin atracție electromagnetică sau prin repulsie electrodinamică.

### 1.2. ISTORIC PRIVIND TRACȚIUNEA ELECTRICĂ

Iată câteva dintre cele mai importante realizări din tracțiunea electrică, în ordine cronologică :

1835 T. Davenport (S.U.A.) construiește la Springfield primul vagon-motor electric, alimentat de la o baterie de elemente galvanice.

1842 R. Davidson (Scoția) experimentează pe linia Edinburgh-Glasgow prima locomotivă electrică (5 tf; 6,5 km/h) cu acționarea osiilor motoare de către electromagneți, care atrăgeau piese polare amplasate direct pe axele osiilor.

1870 Un mecanic necunoscut din Bruxelles construiește primul electromobil, având ca sursă de energie pile cu plăci de zinc și o

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

autonomie de 15 km.

1876 T.A. Piroțki (Rusia) experimentează în orașul Sesbrorețk (pe o cale ferată de 3,5 km) o locomotivă electrică alimentată prin șinele căii de rulare.

1879 31 mai „ziua de naștere” a tracțiunii electrice feroviare; la Expoziția Industrială de la Berlin, firma germană Siemens-Halske pune în funcțiune (pe un traseu circular de cale ferată de 300 m) o locomotivă electrică (2,2 kW; 7 km/h) acționată cu motor de c.c. și alimentată (în c.c. de 150 V) de la o șină centrală, izolată față de sol și față de șinele laterale ale căii de rulare; locomotiva tracta trei vagonete-platformă cu câte șase pasageri fiecare.

1881 Firma Siemens-Halske dă în exploatare prima instalație definitivă de tracțiune electrică: linia de tramvai electric (2,5 km) din cartierul berlinez Gross Lichterfeld.

1881 Pe liniile minelor de sare și potasiu de la Zuckerode (Germania) se introduce prima locomotivă electrică de mină, alimentată în c.c. printr-un fir aerian montat pe plafonul galeriilor.

1882 W. Siemens (Germania) experimentează la Berlin primul troleibuz, echipat cu motoare de c.c. și alimentat de la o linie electrică aeriană bifilară.

1885 F. Sprague (S.U.A.) brevetează motorul electric de tracțiune semisuspendat (suspensia pe nas), pe care îl aplică, apoi, la construcția tramvaielor electrice din orașul Richmond.

1890 Se aplică tracțiunea electrică în c.c. (600 V) la prima rețea metropolitană, construită la Londra.

1895 În S.U.A. se pune sub tensiune primul tronson de cale ferată electrificată în c.c. (675 V) cu linie de contact aeriană.

1898 Se introduce pentru prima dată tracțiunea electrică (în c.a., trifazat de 750 V) pe o linie de cale ferată cu cremalieră (9,3 km):

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Zermatt-Gornergratt (Elveția).

1899 Se dă în exploatare curentă primul tronson de cale ferată cu ecartament normal electrificată în c.a. trifazat (750 V; 40 Hz): Burgdorf-Thun (Elveția).

1901 În Germania, la Wuppertal și Dresda, se pun în funcțiune primele linii de cale ferată (monorai) suspendată prevăzute cu VEM.

1902 A. Zehden brevetează în S.U.A. motorul asincron liniar bilateral și propune aplicarea acestuia în propulsia VEM pe cale ghidată.

1905 Compania engleză North Eastern Railway introduce pe liniile sale prima locomotivă echipată cu grup motor termic-generator electric de c.c. și cu motor electric de tracțiune.

1905 Se pune în funcțiune pe linia de probă Seebach-Wettingen (Elveția) prima locomotivă electrică alimentată în c.a. monofazat (15 kV; 15 Hz) și propulsată cu motoare serie monofazate cu colector.

1908 În Elveția, pe traseul Grindelwald-Wetterhorn, se construiește prima instalație de tracțiune electrică prin cablu destinată transportului de persoane (primul teleferic montan).

1912 – 1913 Administrațiile de cale ferată ale statelor germane, Austriei, Elveției, Suediei și Norvegiei adoptă sistemul unitar de electrificare feroviară în c.a. monofazat de 15 kV și 16 2/3 Hz.

1917 K. Kando (Ungaria) concepe și experimentează prima locomotivă electrică alimentată în c.a. monofazat (16 kV; 50 Hz) și echipată cu motoare asincrone trifazate de tracțiune.

1935 H. Kemper (Germania) brevetează primul vehicul pe pernă magnetică.

1945 Firma Westinghouse (S.U.A.) aplică motorul asincron liniar unilateral cu primar scurt (740 kW; 250 km/h) la așa-numitele "electropulte", destinate lansării rapide a avioanelor cu reacție de pe portavioane.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

1957 Firma Siemens (R.P.G.) construiește prima locomotivă electrică de tip mono-continuu cu redresoare cu diode de siliciu.

1967 Intră în exploatare curentă la Chicago și San-Francisco (S.U.A.) primele VEM de transport urban alimentate de la linia de contact de c.c. prin variator static de tensiune continuă.

1968 Se construiesc și se experimentează (în Franța, Marea Britanie și SUA) primele VEM cu pernă de aer (aerotrenuri; acționate cu motoare asincrone liniare.

1969 Firmele vest-germane Messerschmitt-Bolkow-Blohm GmbH și Krauss-Maffei AG dezvoltă primele-cercetări și experimentări ale VEM pe pernă magnetică pentru transportul de persoane, având propulsia asigurată cu motoare electrice liniare iar sustentăția și ghidarea prin atracție electromagnetică.

1972 Firma Japanese National Railways începe experimentarea vehiculelor electrice hiper-rapide pe pernă magnetică având propulsia prin motoare sincrone liniare cu excitația heteropolară supraconductoare și sustentăția prin repulsie electrodinamică (cu magneți supraconductori); unul din vehiculele electrice realizate de această firmă japoneză, denumit ML-500, stabilește în 1979 pe linia neconvențională de la Miyazaki recordul mondial de viteză al vehiculelor pe cale ghidată: 517km/h,

1980 Apar primele cercetări (R.F.G., S.U.A., Belgia) privind controlul cu microsisteme bazate pe microprocesor al VEM.

1983 Se dă integral în exploatare linia franceză de cale ferată Paris-Lyon cu tracțiune electrică de foarte mare viteză; ramele electrice TGV de tip bicurent (c.a. monofazat de 25 kV și 50 Kz, respectiv c.c. de 1,5 kV) ale acestei linii sunt echipate cu motoare de tracțiune de c.c. serie (525 kW) și sunt destinate traficului de călători cu viteze maxime peste 250 km/h; din 1989 a devenit operațională o a doua generație de rame electrice pentru tracțiunea feroviară de mare viteză, denumite TGV

Atlantique și echipate cu motoare sincrone trifazate de tracțiune (800 kW).

1984 La Birmingham (Marea Britanie) intră în serviciul public primul sistem complet automatizat de transport urban de călători prevăzut cu VEM pe pernă magnetică; pe o cale ghidată dublă, neconvențională, de 610 m, legând aeroportul orașului de stația de cale ferată, se deplasează vagoane-motoare electrice de viteză redusă, propulsate prin motoare asincrone liniare cu comandă automată microprocesorizată, respectiv sustentate și ghidate prin atracție electromagnetică.

1984 Șapte firme vest-germane, încorporate într-un consorțiu industrial, contribuie la realizarea și punerea în funcțiune, pe circuitul de probă din Emsland, a unui vehicul experimental de mare viteză (peste 300 km/h) cu pernă magnetică pentru transportul interurban de călători: TRANSRAPID 06, având propulsia cu motoare sincrone liniare excitate convențional, iar ghidarea și sustentația electromagnetice; din 1988 este operațională varianta TRANSRAPID 06 II, având sisteme de sustentație și ghidare mai performante.

1985 Firma Brown, Boveri & Cie experimentează primul VEM pentru transportul feroviar interurban de mare viteză (350 km/h) cu propulsie prin motoare asincrone trifazate de tracțiune alimentate de la linia de contact de c.a. monofazat prin convertor static de frecvență; din 1988 aceste VEM (denumite ICE) au deținut recordul mondial de viteză al tracțiunii feroviare clasice: 406,9 km/h.

1985 Firma Japan Air Lines pune în funcțiune (pe o linie neconvențională de 350 m) în cadrul Expoziției Internaționale de Știință și Tehnologie (EXPO '85) de la Tsukuba, VEM operațional pe pernă magnetică HSST-03 (viteza maximă 55 km/h) pentru transportul urban de călători, propulsat cu motoare asincrone liniare unilaterale, respectiv

sustentat și ghidat prin electromagneți de c.c. controlați; demonstrația a fost repetată cu succes la EXPO '86 de la Vancouver (Canada).

2006 După ce reușește în cursul anilor 90, mai multe recorduri de viteză, trenul de mare viteză francez TGV, atinge 575km/h.

### 1.3. TRACȚIUNEA ELECTRICĂ ÎN ROMÂNIA

În România, în anul 1893 s-a dat în exploatare curentă în București una dintre primele linii de tramvai electric din lume. În anii imediat următori apar tramvaie electrice și la Timișoara, Iași și Brăila.

Cea dintâi cale ferată electrificată (în c.c. de 1,5 kV) din România a fost construită în 1912 pe linia îngustă Arad-Ghioroc cu ramificații spre Radna și Pîncota. După această premieră națională, în anul 1913 s-a elaborat un studiu privind electrificarea unei linii grele de munte, care să lege Valea Ialomiței de Valea Prahovei între Pietroșița și Sinaia. Izbucnirea primului război mondial a întrerupt studiul și lucrările de construcție a acestei căi ferate electrificate. Preocupările pentru introducerea tracțiunii electrice feroviare s-au reluat începând cu anul 1920, pe primul plan situându-se linia Brașov-Predeal-Ploiești. Până în 1942 au fost elaborate o serie de studii, proiecte și caiete de sarcini pentru electrificarea acestei linii (fie în c.c. de 3 kV, fie în c.a. monofazat de 16 2/3 Hz și 15 kV), dar fără rezultate concrete.

Anul 1959 a constituit punctul de plecare în acțiunea de dotare a căilor ferate românești cu locomotive și trenuri automotoare diesel-electrice construite la întreprinderile "Electroputere" Craiova și „23



August” București. S-a ajuns, recent, la fabricarea locomotivelor diesel-electrice de 4000 CP (pentru export Grecia) și la realizarea echipamentului de acționare cu motor asincron trifazat de tracțiune (375 kW) și convertor static de frecvență pentru echiparea locomotivelor diesel-electrice de 3000 CP.

În anul 1963 a început electrificarea magistralei de cale ferată Brașov-București, în c.a. monofazat de 25 kV și 50 Hz, prima secție electrificată (Brașov-Predeal) fiind dată în exploatare în 1965. Inaugurarea întregii magistrale Brașov-București a avut loc în 16 februarie 1969. De la această dată, electrificarea feroviară în țara noastră cunoaște un ritm susținut, astfel că liniile magistrale grele ce traversează Carpații și unele linii mai ușoare cu trafic intens (însușind peste 3000 km) sunt electrificate și date în exploatare comercială. Preocupările pentru introducerea tracțiunii electrice pe rețeaua feroviară datează încă din perioada interbelică. Studiile întreprinse în acea perioadă, precum și cele ce au urmat au demonstrat clar superioritatea și rentabilitatea tracțiunii electrice în comparație cu tracțiunea cu abur și apoi cu cea Diesel. Din cauza conjuncturii economico-politice, primul tronson de cale ferată electrificată (Brașov – Predeal, 26 km de cale ferată normală dublă) a fost terminat abia în august 1963 și dat în exploatare în decembrie 1965. Dinamica electrificării liniilor de cale ferată a însemnat pentru perioada 1977-1981 punerea în funcțiune a 1.372 km de cale ferată electrificată, reprezentând 36% din totalul liniei electrificate. Însă, începând cu 1985, fondurile alocate întreținerii instalațiilor fixe de

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

tracțiune electrică s-au redus considerabil. Ca urmare a volumului important de lucrări în execuție, cât și a unei politici nu totdeauna corespunzătoare, pentru menținerea ritmului în construirea instalațiilor fixe de tracțiune electrică au fost impuse și adoptate o serie de soluții simplificatoare în faza de proiectare, în scopul reducerii valorii investițiilor (nu totdeauna cu efecte favorabile), iar în execuția lucrărilor s-au utilizat repere fabricate din materiale de calitate inferioară, cu secțiuni reduse și neprotejate suficient contra coroziunii, cu implicații directe asupra fiabilității instalațiilor. În aceste condiții, volumul lucrărilor necesare pentru menținerea în condiții de funcționare a instalațiilor fixe de tracțiune electrică, în special a liniei de contact, a început să depășească posibilitățile de executare a acestora de către



personalul Companiei Naționale de Căi Ferate CFR-SA, fiind necesar să se efectueze lucrări de reparații capitale la un număr din ce în ce mai mare de instalații. Până în prezent, din cei 21.579 km ai rețelei naționale

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

de cale ferată, s-au electrificat 9.652 km de cale ferată, respectiv un procent de 44%, de pe liniile curente și directe, de pe cele abătute din stațiile de cale ferată, precum și din triaje și depouri. De menționat este faptul că realizarea de noi electrificări, rezolvarea problemelor legate de menținerea în funcțiune la parametrii proiectați a instalațiilor existente, modernizarea în scopul îmbunătățirii performanțelor tehnico-economice și realizarea de instalații apte de a asigura unele sporuri de viteză preconizate necesită, pe lângă efortul tehnic al specialiștilor din domeniu, efortul financiar al Căii Ferate, al Guvernului României și o importantă susținere financiară internațională, precum și colaborarea tehnică a firmelor și specialiștilor din țară și din străinătate. Astfel, pentru Compania Națională de Căi Ferate CFR-SA, ISPCF a elaborat, ca o prioritate, un studiu de fezabilitate privind extinderea electrificării rețelei feroviare. Studiul ia în considerare executarea unor lucrări care urmaresc în principal eliminarea defectelor infrastructurii liniilor actuale studiate, dublarea pe tronsoanele de linie simplă (unde este cazul), electrificarea în întregime a secțiilor de circulație studiate, modernizarea și generalizarea instalațiilor de bloc de linie automat (BLA) și a instalațiilor de centralizare electrodinamică (CED).

Consecințele imediat următoare ale acestor realizări vor fi:

- electrificarea secțiilor de circulație studiate va înlocui tracțiunea Diesel, consumatoare de hidrocarburi din import (ce implică aport valutar), prin tracțiunea electrică, ce utilizează energie produsă în țară,

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- excedentară, și care nu poate fi stocată. Aceasta va avea ca efect direct reducerea cheltuielilor operatorilor de transport;
- creșterea vitezelor tehnice și a celor de circulație până la 160 km/h pe anumite tronsoane ale liniilor de cale ferată;
  - reducerea timpilor de mers;
  - sporirea capacităților secțiilor față de cele existente în prezent;
  - înlocuirea pe o perioadă de șase luni anual a încălzirii trenurilor de călători prin consum de hidrocarburi prin încălzire pe bază de energie electrică, eliminând cheltuielile de exploatare și de deservire;
  - reducerea gradului de poluare al mediului înconjurător;
  - reducerea personalului din activitatea de exploatare și utilizarea acestuia pe alte secții de circulație;
  - crearea de noi locuri de muncă pe perioada realizării investițiilor;
  - creșterea siguranței circulației feroviare și reducerea accidentelor;
  - creșterea gradului de confort în transportul călătorilor și a calității serviciilor puse la dispoziția acestora;
  - accelerarea rotației capitalului prin reducerea duratei de transport al marfurilor;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- reducerea necesității transportului auto în comun, pe anumite secții;
- crearea posibilității de introducere a sistemului de transport suburban de călători prin rame de tren cu circulație pendulară pe secția Constanța–Mangalia, cu implicații asupra creșterii importanței turistice și economice a zonei;
- readucerea la parametrii proiectați, prin lucrări de RK, a liniilor de cale ferată electrificate în prezent;
- uniformizarea caracteristicilor și a dotărilor tehnice cu cele ale rețelelor feroviare europene.

În 1967 întreprinderea „Electroputere” Craiova a realizat (după licență ASEA-Suedia) prima locomotivă electrică de 5100 kW, reprezentând una dintre cele mai puternice locomotive de tip mono-continuu echipate cu redresoare cu diode de siliciu. De atunci, fabricația de VEM pentru tracțiunea electrică feroviară s-a diversificat prin construirea și darea în exploatare curentă a primului tip de ramă electrică suburbană de 1870 kW și prin asimilarea locomotivei electrice tiristorizate de 5100 kW. Pe plan politic se prevede extinderea tracțiunii electrice în traficul feroviar românesc de la 57% în 1985 la 80% în 2005.

Referitor la VEM neautonome de tracțiune electrică rutieră, trebuie menționat că la noi în țară parcul de tramvaie, și troleibuze este într-o continuă extindere și modernizare în condițiile unui trafic intens urban și suburban. S-a trecut la varianta de VEM articulat, de mare capacitate, iar în cazul tramvaiului, la seria silențioasă, începând cu anul 1972 s-au realizat troleibuze și tramvaie articulate echipate cu variatoare

statice de tensiune continuă, din 1983 acestea fiind date în exploatare curentă .

Ca urmare a cercetărilor pluridisciplinare întreprinse, din 1976, de CCSIT "Electroputere" Craiova și de Institutele Politehnice din Timișoara și Iași, întreprinderea "Electroputere" Craiova a realizat primul VEM neautonom cu motoare asincrone liniare (denumit ROM-U-LIM-01; 560kW; 120 km/h) destinat transportului urban și suburban de mare capacitate; acest VEM este alimentat de la linia de contact de c.c. prin invertor trifazat tiristorizat și circulă pe o cale de tipul sistemului feroviar, fiind prevăzut cu roți metalice de sustentație și ghidare. În cadrul Institutului Politehnic Iași a fost proiectată și construită o familie (denumită VEMLI) de VEM experimentale cu propulsie prin motor asincron liniar bilateral (150 kW); alimentarea acestui VEM este în c.a. trifazat (380 V), iar sustentația și ghidarea sunt convenționale (sistem roată-șină). Se află, de asemenea, în fază experimentală, la Institutul Politehnic Timișoara și întreprinderea "Electroputere" Craiova, o primă familie (denumită MAGNIBUS) de VEM pe pernă magnetică pentru transportul urban și interurban de mare viteză (300 km/h); propulsia și (parțial) sustentația acestor VEM se realizează integrat cu motoare liniare sincrone homopolare, alimentate prin convertor stație de frecvență, iar ghidarea se asigură prin electromagneți de c.c. controlați.

În țara noastră sunt de remarcat și o serie de cercetări, experimentări și realizări de VEM autonome pentru transportul rutier. Astfel, în 1974 la ICPAT Brașov a fost construit primul automobil electric românesc, echipat cu motor de c.c. serie (7 kW), variator static de tensiune continuă și baterie de acumulatori cu plumb. În 1977, la întreprinderea „Autobuzul” București s-a realizat primul electrobus acționat cu motor de c.c. cu excitație separată (74 kW) și alimentat de la o baterie cu Pb-acid amplasată într-o remorcă. Prin colaborarea dintre

Institutul Ppolitehnic Timișoara și „Dacia Service” Timișoara au fost construite în variantă de prototip două electromobile pe caroseria autoturismului „Dacia 1300” și o electroutilitară, acționate cu motoare de c.c. cu excitație separată; s-au experimentat două soluții de comandă a propulsiei: una cu variator static de tensiune continuă, cealaltă neelectronică, secvențială, cu slăbire de câmp prin prize pe înfășurarea de excitație. În sfârșit, la întreprinderea Mecanică din orașul Ștei, se realizează electrocare și electro-stivuitoare acționate cu motor de c.c. serie ( $2.5 \div 5$  kW) și alimentate de la baterii de acumulatori cu plumb (24 și 80 V). Recent, s-a trecut și aici la sistemul de acționare cu variatoare statice de tensiune continuă, care permit eliminarea principalelor pierderi de energie la reglajul vitezei motorului de tracțiune și creșterea randamentului funcțional al bateriei de acumulatori.

În domeniul tracțiunii electrice subterane, trebuie evidențiată ca o realizare, inaugurarea la 19 decembrie 1979, în București, a primului tronson de metrou al magistralei I (Est-Vest). Prin darea în exploatare și a celei de a doua magistrale diametrice (Nord-Sud), rețeaua metroului bucureștean (având, la finele anului 1988, o lungime de 50 km și un număr de 32 de stații în exploatare) poate prelua peste o treime din nevoile de transport ale cetățenilor Capitalei. Propulsia ramei de metrou este realizată prin motoare de c.c. serie (185 kW), alimentate în c.c. (750 V) printr-o șină de contact plasată lateral față de VEM. Sustentația și ghidarea sunt asigurate prin roțile metalice ale VEM și șinele căii de rulare. Referitor la acest VEM, sunt în fază experimentală realizarea schemei de tracțiune cu motoare asincrone trifazate alimentate prin invertor, precum și introducerea frânării electrice recuperative.

Pentru tracțiunea electrică minieră, în țara noastră sunt în exploatare locomotive electrice de mină echipate cu motoare de c.c. serie antigrizutoase, alimentate în c.c. fie de la baterii de acumulatori (72 V),

fie prin fir de contact (250 sau 550 V). Au fost realizate, prin colaborarea dintre Institutul Politehnic Timișoara și întreprinderea "Unio" Satu Mare, locomotive electrice miniere tiristorizate, alimentate în c.a. monofazat și echipate cu convertoare statice c.a. – c.c. pentru reglarea turației motoarelor de tracțiune de c.c. serie.

În ceea ce privește tracțiunea electrică prin cablu, se menționează că primele teleferice (cu cabine și cu scaune) au fost construite, în 1971, la Poiana Brașov și Predeal. La nivelul anului 2006, existau în țară 112 astfel de instalații de tracțiune electrică prin cablu, în 14 județe .

### 1.4. STRUCTURA GENERALĂ A UNUI SISTEM DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ (STE)

#### 1.4.1. STE cu VEM neautonome

Așa cum se vede în schema de principiu (fig. 1.1) un STE cu VEM neautonome are două componente de bază, aflate în strânsă condiționare reciprocă: *instalațiile fixe* și *instalațiile mobile de tracțiune electrică*.

Instalațiile fixe aferente unui STE cu VEM neautonome sunt:

- *instalații de producere, transport și distribuție a energiei electrice*, reprezentând centrale electrice (CE), stații de transformare ridicătoare de tensiune (STR) și linii electrice aeriene (LEA) de distribuție în înaltă tensiune; aceste instalații electroenergetice nu sunt specifice STE.

- *substații de tracțiune electrică (SSTE)*, semnificând instalații fixe pentru racordare la sistemul electroenergetic de înaltă tensiune și adaptarea parametrilor energiei electrice (tensiune, curent etc.) la necesitățile tracțiunii electrice;



– *fideri de alimentare (FA)*, reprezentând linii electrice aeriene de lungime redusă care servesc la alimentarea cu energie electrică a liniei de contact de la SSTE; în zona fider din dreptul unei SSTE se prevede, uzual, secționarea simplă (cu lamă de aer) a liniei de contact (fig.1.1).

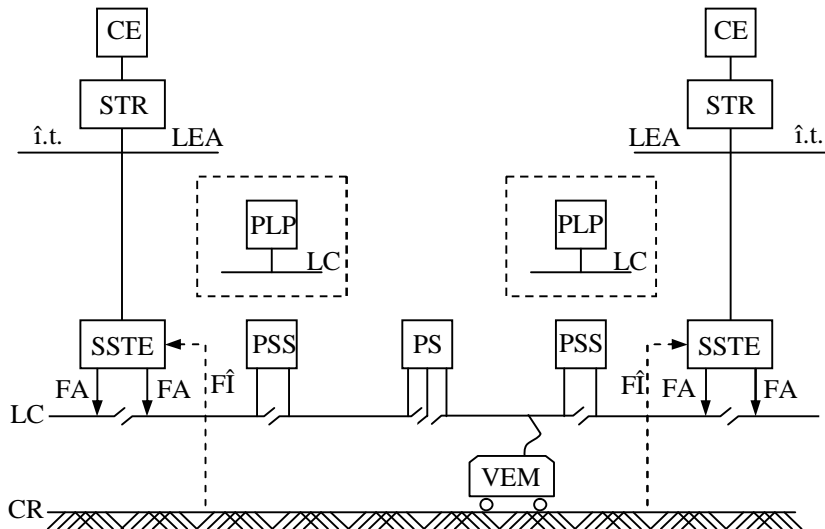


Fig. 1.1. STE cu VEM neautonome (pe cale de rulare).

Schema generală de principiu

– *Linie de contact (LC)*, constituind o rețea electrică de c.c. sau c.a., care asigură transportul energiei electrice în lungul căii de circulație și de la care VEM își culege energia electrică prin intermediul unei prize de curent alunecătoare;

– *posturi de secționare (PS)*, definind instalații fixe amplasate aproximativ la jumătatea distanței dintre două SSTB adiacente cu scopul secționării sau conectării longitudinale și transversale a LC din necesități de exploatare, întreținere și protecție; PS din fig. 1.1 realizează o secționare cu zonă neutră;

– *posturi de subsecționare (PSS)*, semnificând instalații fixe care permit secționarea sau conectarea longitudinală și transversală a LC între

o SSTE și un PS;

- *posturi (sau puncte) de legare în paralel (PLP)*, reprezentând instalații fixe care realizează, în cazul căilor de circulație dublă legarea suplimentară în paralel a ramurilor LC, între SSTE și PS, atunci când în schema generală a STE nu sunt cuprinse PSS;

- *cale de rulare/zbor (CR/Z)*, constituind calea de circulație a VEM și putând fi: metalică, din beton sau mixtă; în cazul VEM cu aderență la CR, aceasta are un rol esențial în procesul de formare a forțelor de tracțiune și de frânare, iar în cazul particular al VEM cu roți metalice pe CR metalică (fig. 1.1), șina acesteia are și rolul specific de conductor de întoarcere al curentului electric de tracțiune spre SSTE;

- *fideri de întoarcere (FÎ)*, reprezentând cabluri sau LEA de racord între șina metalică a CR (respectiv, ramura negativă a LC bifilare de c.c.) și circuitul de forță al SSTE.

Instalațiile mobile de tracțiune electrică sunt chiar VEM care primesc energie electrică de la LC și o transformă în energie mecanică, necesară deplasării lor și a vehiculelor pe care le remorchează. Alimentarea VEM de la LC se face în c.c. sau c.a., la diverse tensiuni și frecvențe. Astfel, în tracțiunea electrică rutieră și subterană se utilizează, preponderent, c.c. cu tensiuni uzuale între 0,4 și 1,5 kV. În tracțiunea electrică feroviară se folosesc următoarele sisteme de electrificare, enumerate în ordinea cronologică a apariției lor:

- sistemul curentului alternativ trifazat, cu frecvențe între 15 și 40 Hz și tensiuni de  $0,75 \div 10$  kV, aplicat la primele electrificări feroviare în Elveția și nordul Italiei;

- sistemul curentului continuu, cu tensiunea de 1,5 kV, răspândit în Franța (parțial), Olanda, Japonia etc., respectiv de 3 kV, aplicat în Cehia, Polonia, Italia, Belgia etc.;

- sistemul curentului alternativ monofazat cu frecvență joasă de

16 2/3 Hz și tensiunea de 15 kV, utilizat în Germania., Elveția, Austria, Norvegia, Suedia, respectiv cu frecvență joasă de 25 Hz și tensiunea de 11 kV, aplicat (parțial) în S.U.A;

– sistemul curentului alternativ monofazat cu frecvența industrială 50 (sau 60) Hz și tensiunea 25 kV, răspândit în Rusia., Ungaria, Bulgaria, Cehia (parțial), Anglia, Franța (parțial), China, Portugalia, Danemarca, România etc.

Acest din urmă sistem de electrificare feroviară s-a consacrat în ultimul timp, datorită avantajelor tehnico-economice pe care le posedă comparativ cu celelalte sisteme. El a fost adoptat atât în țările care au trecut mai recent la electrificarea căilor ferate (cazul țării noastre), cât și în țările care au deja rețea feroviară electrificată într-unul din celelalte sisteme, dar care își continuă electrificarea căilor ferate.

Sistemele anterioare de energoalimentare aferente tracțiunii electrice au determinat următoarele tipuri operaționale de VEM neautonome (fig. 1.2):

– VEM echipate cu motor de tracțiune de c.c. serie și alimentate de la LC de c.c. prin reostat de pornire și frânare (RPF) sau prin variator static de tensiune continuă (VTC) (fig. 1,2, a); astfel de VEM neautonome sunt, de exemplu, VEM convenționale de transport urban (tramvaie, troleibuze, metrouri), locomotivele electrice clasice pentru căi ferate electrificate în c.c., locomotivele electrice de mină tradiționale etc.;

– VEM echipate cu motor asincron trifazat de tracțiune de tip rotativ sau liniar (MAL) și alimentate de la LC de c.c. prin invertor trifazat (IT) (fig. 1.2, b); astfel de VEM neautonome sunt, de exemplu, VEM neconvenționale de transport urban și suburban;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

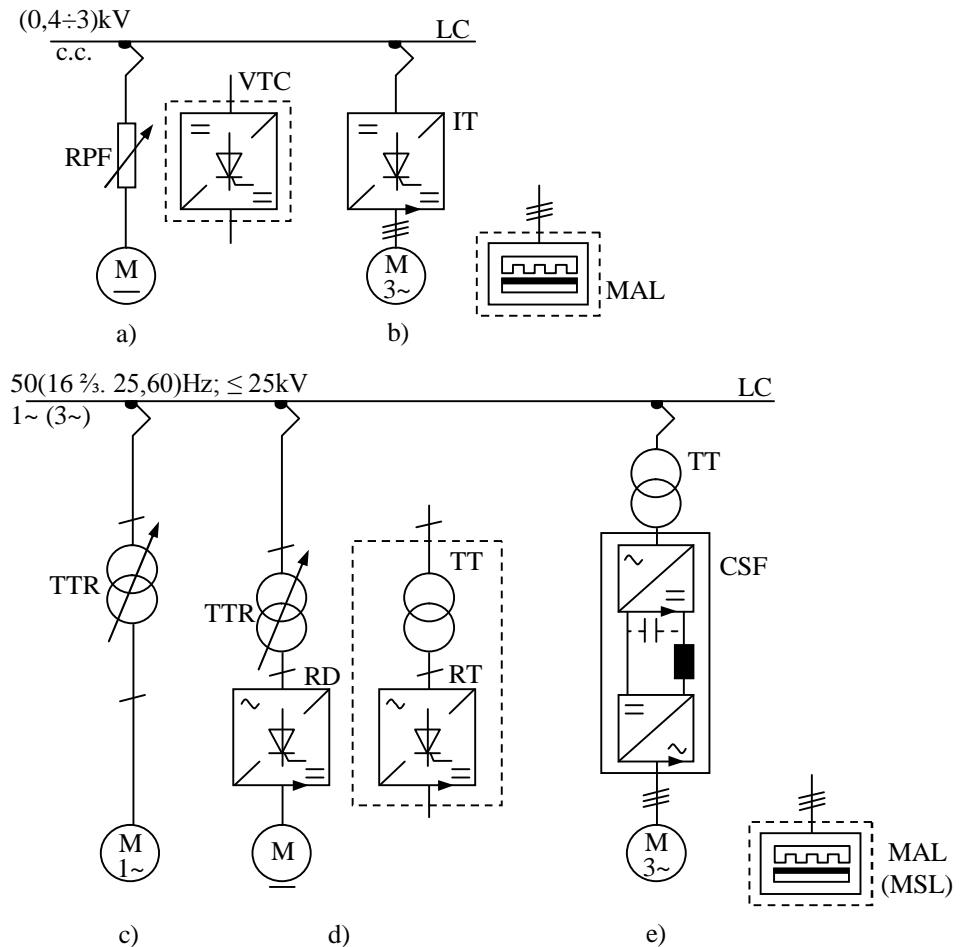


Fig. 1.2. Schema de principiu a circuitului electric de forță la tipurile operaționale de VEM neautonome,

– VEM echipate cu motor de tracțiune de tip serie monofazat cu colector și alimentate de la LC de c.a. monofazat, de frecvență joasă ( $16 \frac{2}{3}$  sau 25 Hz) prin transformator de tracțiune reglabil (TTR) (fig. 1.2, c); astfel de VEM neautonome sunt, de exemplu, locomotivele și ramele electrice feroviare din Germania., Elveția, S.U.A. etc.;

– VEM echipate cu motor de tracțiune de c.c. serie și alimentate de la LC de c.a. monofazat, de frecvență industrială (50 sau 60 Hz), prin TTR și redresor cu diode (RD) sau prin transformator de tracțiune (TT) și redresor cu tiristoare (RT) (fig. 1.2, d); astfel de VEM neautonome

sunt, de exemplu, locomotivele electrice de tip mono-continuu.

– VEM echipate cu motor de tracțiune trifazat, de tip asincron rotativ, MAL sau sincron liniar (MSL) și alimentate de la LC de c.a. mono sau trifazat prin TT și convertor static de frecvență (CSF) (fig. 1.2, e); astfel de VEM neautonome sunt, de exemplu, locomotivele și ramele electrice feroviare neconvenționale, VEM pe pernă de aer sau magnetică etc.

Randamentul energetic global  $\eta_{STE}$  al STE cu VEM neautonome corespunde diagramei de flux energetic din fig. 1.3. Rezultă :

$$\eta_{STE} = \frac{\text{energia (mecanică) de ieșire din VEM neautonom}}{\text{energia (primară) de intrare în CE}} =$$

$$= \eta_{CE} \cdot \eta_{STR-LEA} \cdot \eta_{SSTE} \cdot \eta_{LC} \cdot \eta_{VEM} \quad (1.1)$$

cu valorile maxime aproximative: 20%, în cazul CE cu cărbune și nucleare, respectiv 60%, în cazul centralelor hidroelectrice. Trebuie precizat, că  $\eta_{STE}$  poate depăși valorile anterioare prin aplicarea frânării electrice recuperative a VEM neautonome.

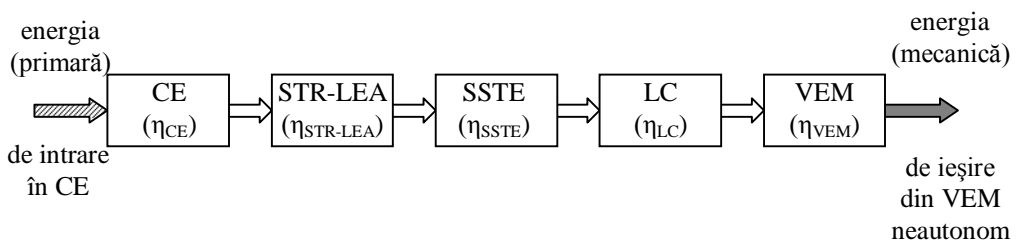


Fig. 1.3. Diagrama de flux energetic corespunzătoare STE cu VEM neautonome.

### 1.4.2. STE cu VEM autonome

În cazul STE cu VEM autonome sursa de energie electrică este plasată chiar pe VEM, astfel că în structura generală a acestor STE nu mai sunt necesare instalațiile fixe de electroalimentare (în măsura în care se face abstracție de instalațiile electrice aferente procesului de încărcare a sursei de energie electrică de tip baterie de acumulare de pe VEM autonom).

Ca urmare, se poate considera, în acest caz, că STE se rezumă la instalațiile mobile de tracțiune electrică (adică, VEM autonome) și la CR.

În această accepțiune, principalele STE cu VEM autonome sunt: locomotivele diesel-electrice (fig. 1.4, a) și locomotivele electrice de mină cu acumulare (fig. 1.4, b) având CR ghidată de tip feroviar, respectiv electro-mobilele (fig. 1.4, b, c), având CR neghidată (carosabil).

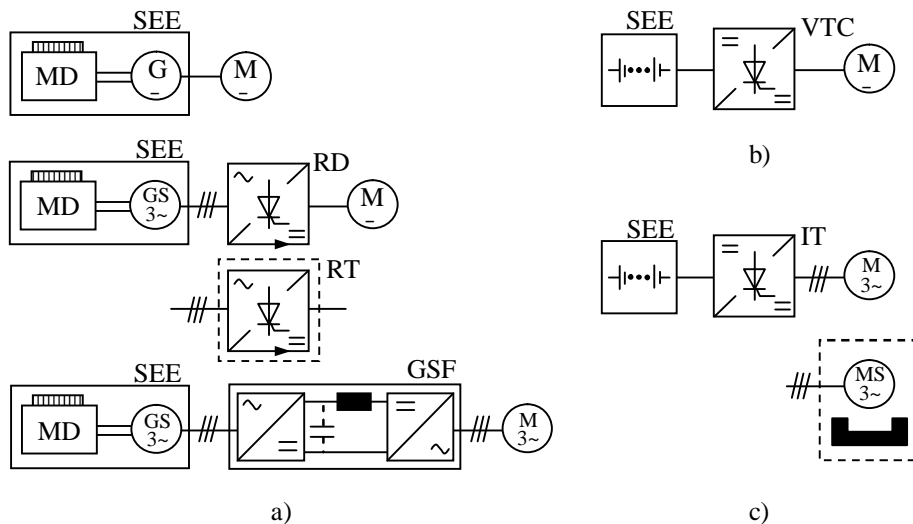


Fig. 1.4. Schema de principiu a circuitului electric de forță la tipurile operaționale de VEM autonome.

În circuitul electric de forță al VEM autonome operaționale se evidențiază (fig. 1.4):

- *sursa de energie electrică (SEE)*, reprezentând grup motor diesel (MD) - generator electric (de c.c. sau sincron trifazat), în cazul locomotivelor diesel-electrice, respectiv baterie de acumulare, pilă de combustie etc., în cazul electromobilelor și locomotivelor electrice miniere autonome;

- *motorul electric (rotativ) de tracțiune (MET)*, putând fi motor de c.c. cu excitație serie sau separată, motor asincron trifazat, motor sincron cu magneți permanenți etc.;

- *convertorul static (CS)*, interpus în circuitul de forță al VEM autonom ca dispozitiv electronic de adaptare între SEE și MET și reprezentând un VTC, RD sau RT, în cazul MET de c.c, respectiv un IT sau CSF, în cazul MET de c.a.

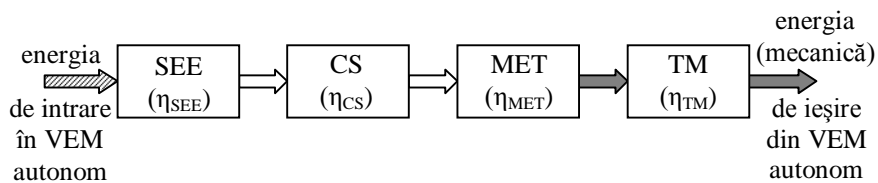


Figura 1.5. Diagrama de flux energetic corespunzătoare VEM autonome

Randamentul energetic global  $\eta_{VEM,a}$  al subsistemului de tracțiune electrică reprezentat de VEM autonom corespunde diagramei de flux energetic din fig. 1.5. și se definește prin produsul randamentelor parțiale ale elementelor componente: SEE, CS, MET, respectiv transmisia

mecanică (TM) (a cuplului dezvoltat de MET de la acesta la roțile motoare ale VEM autonom). Rezultă:

$$\eta_{\text{VEM,a}} = \frac{\text{energia (mecanica) de iesire}}{\text{energia de intrare}} = \eta_{\text{SEE}} \cdot \eta_{\text{CS}} \cdot \eta_{\text{MET}} \cdot \eta_{\text{TM}} \quad (1.2)$$

Valorile maxime aproximative pentru  $\eta_{\text{VEM,a}}$  sunt: 30%, în cazul locomotivelor diesel-electrice, respectiv 70%, în cazul electromobilelor și locomotivelor electrice de mină cu acumulatori; în acest din urmă caz,  $\eta_{\text{VEM,a}}$  poate să crească prin aplicarea frânării electrice recuperative a VEM autonome.



## **CAPITOLUL 2**

### **BAZELE DINAMICII VEM**

## INTRODUCERE

În timpul mișcării de translație a VEM în lungul căii de circulație, sub acțiunea organelor sale de propulsie, mai are loc concomitent: (i) mișcarea de rotație a rotoarelor motoarelor de tracțiune, osiilor (punților), roților și mecanismelor solidare cu acestea, în cazul VEM cu propulsie prin motoare electrice rotative, respectiv (ii) mișcarea de translație după direcția normală la calea a armăturilor mobile ale motoarelor de tracțiune și elementelor solidare cu acestea, în cazul VEM cu propulsie prin motoare electrice liniare.

În plus peste aceste mișcări se suprapun întotdeauna oscilații și șocuri rezultate din interacțiunile VEM cu calea de circulație și cu mediul înconjurător, respectiv din interacțiunile elementelor structurii mecanice a VEM.

### 2.1. ECUAȚIILE ȘI STABILIREA MIȘCĂRII UTILE A VEM

În cele ce urmează, VEM este asimilat cu un corp rigid, aflat în mișcare de translație în lungul căii de circulație. Această mișcare utilă a VEM este determinată de:

- forțe controlabile de către conducătorul VEM, reprezentând forțele de tracțiune și de frânare;
- forțe necontrolabile de pe VEM, reprezentând forțele de rezistență la înaintare.

Ca sens pozitiv al forței de tracțiune  $\overline{F}_t$  se consideră sensul mișcării utile de translație a VEM în lungul căii de circulație, iar

ca sens pozitiv al forței de frânare  $\overline{F}_f$  și al forței totale de rezistență la înaintare  $\overline{F}_r$ , sensul opus acestei mișcări. Ca atare, forțele de tracțiune și de frânare sunt întotdeauna pozitive, iar forța de rezistență totală la înaintare este pozitivă în majoritatea situațiilor, dar poate deveni nulă sau chiar negativă în cazul când VEM coboară pante suficient de mari.

Ca precizările anterioare, ecuația mișcării utile a VEM în, lungul căii de circulație se poate scrie aplicând VEM legea fundamentală a dinamicii:

$$m_a (dv / dt) = F_t - F_f - F_r \quad (2.1)$$

unde  $v$  definește viteza de deplasare utilă a VEM, iar  $m_a$ , masa echivalentă da translație (sau masa aparentă) a corpului rigid reprezentat de VEM. În cazul VEM posedând motoare electrice liniare pentru propulsie și pernă de aer sau magnetică pentru sustentație și ghidare,  $m_a$  coincide cu însăși masa totală  $m$  a VEM. În cazul VEM echipate ca motoare rotative de tracțiune, roți, osii (punți) și organe de transmisie a cuplului motor solidare cu acestea,  $m_a$  înglobează și masa redusă de translație  $m'_a$  corespunzătoare subansamblurilor rotitoare ale VEM, definită în baza echivalenței de energii cinetice:

$$\frac{1}{2} m'_a v^2 = \frac{1}{2} \sum_k J_{R,k} \Omega_R^2 + \frac{1}{2} \sum_k J_k \Omega_k^2 \eta_{t,k} \quad (2.2)$$

unde cu  $J_{R,k}$ ,  $\Omega_R$  respectiv  $J_k$ ,  $\Omega_k$ , s-au notat momentele de inerție masice și vitezele unghiulare ale roților motoare, respectiv ale organelor rotitoare ale transmisiei (de randament  $\eta_{t,k}$ ) cuplului motor, inclusiv rotoarele motoarelor electrice de tracțiune. Relația între viteza  $v$  a mișcării utile a VEM și vitezele unghiulare ale subansamblurilor VEM aflate în mișcare de rotație este :

$$v = \Omega_R r_R = \Omega_k r_R / i_{t,k} \quad (2.3)$$

unde cu  $r_R$  s-a notat raza exterioară de rotație (sau raza de rulare) a roților motoare ale VEM, iar cu  $i_{t,k}$ , raportul de transmisie între elementul rotitor oarecare  $k$  și roțile motoare. Din (2.2) și (2.3), se obține, după simplificări:

$$m'_a = \sum_k (J_{R,k} / r_R^2) + \sum_k (J_k i_{t,k}^2 \eta_{t,k} / r_R^2) \quad (2.4)$$

și, deci, în cazul VEM cu aderență la CR, propulsate cu motoare rotative de tracțiune, masa echivalentă de translație (sau masa aparentă) are expresia:

$$m_a = m + m'_a = m \left[ 1 + \sum_k (J_{R,k} / m r_R^2) + \sum_k (J_k i_{t,k}^2 \eta_{t,k} / m r_R^2) \right] = m(1 + \gamma_1 + \gamma_2) = m\xi \quad (2.5)$$

unde  $\gamma_1 = \sum_k (J_{R,k} / m r_R^2)$  și  $\gamma_2 = \sum_k (J_k i_{t,k}^2 \eta_{t,k} / m r_R^2)$  definesc coeficienți adimensionali de echivalare a maselor în mișcare de rotație din structura VEM, adică a roților motoare, respectiv a organelor rotitoare ale sistemului de transmitere a cuplului motor, inclusiv rotoarele motoarelor electrice de tracțiune. În relația (2.5), mărimea adimensională  $\xi = 1 + \gamma_1 + \gamma_2$  definește, la rândul ei, factorul de masă (sau coeficientul global de inerție) al VEM, depinzând de tipul acestuia și luând, ca urmare, valorile aproximative:  $1,2 \div 1,4$ , pentru locomotive electrice și diesel-electrice;  $1,15 \div 1,2$ , pentru troleibuze;  $1,1 \div 1,3$ , pentru electromobile;  $1,09 \div 1,15$ , pentru tramvaie;  $1,08 \div 1,12$ , pentru ramele de metrou și, evident, 1, pentru VEM propulsate cu motoare electrice liniare, respectiv sustentate și ghidate cu pernă de aer sau magnetică.

În situațiile curente ale tracțiunii electrice, nu se aplică simultan forța de tracțiune și cea de frânare, astfel că regimurile normale de mișcare utilă a VEM sunt:

- regimul de tracțiune în care  $F_t=0$ ; ținând seama și de (2.5), ecuația de mișcare (2.1) obține forma:

$$m\xi(dv/dt) = F_t - F_r \quad (2.6)$$

dacă forța inerțială  $F_t - F_r > 0$ , ea se numește forță de accelerare, întrucât din (2.6) rezultă  $(dv/dt) > 0$ ; dacă  $F_t = F_r$ , atunci  $(dv/dt) = 0$ , mișcarea utilă a VEM în regim de tracțiune fiind o mișcare uniformă cu viteza de regim  $v = v_r = \text{const.}$ ;

- regimul de mers lansat, în care  $F_t = F_r = 0$ , astfel că ecuația de mișcare (2.1) devine:

$$m\xi(dv/dt) = -F_r \quad (2.7)$$

pe rampe, în palier (adică, pe suprafețe orizontale) și pe pante nu prea mari  $F_r > 0$ , astfel că viteza VEM în regim de mers lansat se reduce (întrucât din (2.7) rezultă  $(dv/dt) < 0$ ); pe pante suficient de mari,  $\overline{F_r}$  poate avea sensul mișcării utile a VEM, adică  $F_r < 0$  și atunci viteza VEM crește (întrucât din (2.7) rezultă  $(dv/dt) > 0$ ); este posibil și cazul de mers lansat cu viteză constantă, când pe pantă  $F_r = 0$ ; în regimul de mers lansat VEM se deplasează în virtutea inerției, motoarele electrice de tracțiune de pe VEM fiind deconectate de la sursa de energie electrică (regim de "mers fără curent"); ca urmare, regimul de mers lansat este recomandat îndeosebi pentru VEM de tip urban și suburban (propulsate cu motoare electrice de tracțiune rotative sau liniare), în scopul realizării unui mers economic, adică al obținerii de economii de energie electrică;

- regimul de frânare, în care  $F_t = 0$ , astfel că ecuația de mișcare (2.1) devine:

$$m\xi(dv/dt) = -(F_f + F_r) \quad (2.8)$$

uzual, se aplică VEM o asemenea forță de frânare, încât  $F_f + F_r \geq 0$ , obținându-se fie o decelerare ( $F_f + F_r > 0$ ,  $(dv/dt) < 0$ ), fie, pe pante mari, o mișcare uniformă a VEM ( $F_f + F_r = 0$ ,  $(dv/dt) = 0$ ); în acest al doilea caz, frânarea este utilizată pentru, limitarea vitezei VEM la valoarea maximă admisă pe panta respectivă și se numește frânare limitativă (sau de menținere); evident, regimul de frânare neelectrică este un regim de „mers fără curent” al VEM. Pentru comoditatea calculelor privind dinamica VEM, se operează adesea cu forțele specifice da tracțiune, de frânare, respectiv de rezistență totală la înaintare, exprimate, uzual, în N/kN (sau în daN/t), conform relațiilor:

$$f_t = F_t / G, \quad f_f = F_f / F, \quad f_r = F_r / G, \quad \text{/N/kN/} \quad (2.9)$$

unde  $G=mg$  reprezintă greutatea totală, în kN, a VEM, cu  $m$ , masa VEM în tone și  $g$ , accelerația gravitațională, în  $m/s^2$ . În baza definițiilor anterioare (2.9), ecuația mișcării utile a VEM (2.1) obține forma:

$$(dv/dt) = \varphi(f_t - f_f - f_r) \quad (2.10)$$

unde  $\varphi = g \cdot 10^{-3} / \xi = g \cdot 10^{-3} / (1 + \gamma_1 + \gamma_2)$  semnifică accelerația (sau decelerația), în  $m/s^2$ , imprimată VEM (pe direcția de mișcare în lungul căii de circulație) de către o forță specifică rezultantă de 1 N/kN.

Deoarece forțele specifice  $f_t$ ,  $f_f$  și  $f_r$  sunt funcții continue de viteza  $v$  de deplasare a VEM în lungul căii de circulație, ecuația diferențială (2.10) a mișcării utile a VEM poate fi liniarizată în ipostaza unor deviații mici ale mărimilor mecanice în jurul valorilor corespunzătoare unui regim da mișcare uniformă, numit regimul de mișcare de bază. Astfel, considerând, de exemplu,

regimul-de tracțiune al VEM și notând cu  $\Delta v$ ,  $\Delta f_t$  și  $\Delta f_r$  abaterile mici ale vitezei de deplasare și forțelor specifice  $f_t$ , respectiv  $f_r$  în raport cu valorile lor  $v^\circ$ ,  $f_t^\circ$ , respectiv  $f_r^\circ$  corespunzătoare regimului de mișcare de bază, ecuația diferențială (2.10) devine:

$$d(v^\circ + \Delta v)/dt = \varphi[(f_t^\circ + \Delta f_t) - (f_r^\circ + \Delta f_r)] \quad (2.11)$$

$$\Delta f_t = (\partial f_t / \partial v) \Delta v + \Delta f_t' \quad (2.12)$$

$$\Delta f_r = (\partial f_r / \partial v) \Delta v + \Delta f_r' \quad (2.13)$$

unde derivatele parțiale în raport cu viteza sunt considerate în punctul de funcționare corespunzător regimului de mișcare de bază și unde cu  $\Delta f_t'$  și  $\Delta f_r'$  s-au notat abaterile forțelor specifice de tracțiune, respectiv de rezistență totală la înaintarea VEM, datorate influenței altor factori decât viteza  $v$  (de exemplu, mărimile electrice de alimentare și comandă ale motoarelor de tracțiune de pe VEM). Ținând seama de (2.12), (2.13) și de ecuația ce caracterizează regimul de mișcare de bază,

$$f_t^\circ = f_r^\circ \quad (2.14)$$

din (2.11) rezultă ecuația diferențială liniarizată a mișcării utile a VEM în care intervine, ca singură variabilă, abaterea de viteză  $\Delta v$ :

$$\frac{d(\Delta v)}{dt} + \varphi \left( \frac{\partial f_r}{\partial v} - \frac{\partial f_t}{\partial v} \right) \Delta v = \varphi (\Delta f_t' - \Delta f_r') \quad (2.15)$$

Prin împărțirea ecuației diferențiale, liniare de ordinul întâi (2.15) cu coeficientul lui  $\Delta v$  se obține:

$$T_m \frac{d(\Delta v)}{dt} + \Delta v = \frac{\Delta f_t' - \Delta f_r'}{(\partial f_r / \partial v) - (\partial f_t / \partial v)} \quad (2.16)$$

unde  $T_m = \varphi^{-1}[(\partial f_r / \partial v) - (\partial f_t / \partial v)]^{-1}$  are semnificația unei constante mecanice de timp, caracterizând întârzierea abaterii, vitezei de mers față de abaterea forței specifice, de tracțiune și/sau a forței

specifice de rezistență totală la înaintare (corespunzător regimului de tracțiune al VEM).

Stabilitatea mișcării utile a VEM, în cazul, abaterilor mici, față de regimul de mișcare de bază, definește proprietatea VEM de a restabili prin acțiunea sa un nou regim normal de mișcare uniformă, atunci când a fost scos din regimul, de mișcare de bază ca urmare a variației forței rezultante ce îi determină mișcarea utilă. Stabilitatea astfel definită este asigurată în regimul de tracțiune al VEM, dacă ecuația caracteristică asociată ecuației diferențiale liniarizate (2.15) :

$$p + \varphi[(\partial f_r / \partial v) - (\partial f_t / \partial v)] = 0 \quad (2.17)$$

are toate rădăcinile situate în semiplanul complex stâng, ceea ce în cazul simplu al ecuației caracteristice de gradul întâi (2.17) revine la condiția de pozitivitate a coeficienților acestei ecuații, adică:

$$(\partial f_r / \partial v) > (\partial r_r / \partial v) \quad (2.18)$$

Interpretarea geometrică a condiției de stabilitate (2.18) este următoarea: în regimul de tracțiune al VEM, în punctul de funcționare corespunzător unui regim normal de mișcare uniformă, panta tangentei la caracteristica de viteză a forței (specifice) de tracțiune aplicate VEM, trebuie să fie mai mică decât panta tangentei la caracteristica de viteză a forței (specifice) de rezistență totală la înaintare a VEM.

Considerații similare privind stabilitatea mișcării utile a VEM se pot face și pentru regimul de frânare al VEM. Astfel, este ușor de arătat că pentru acest regim, condiția de stabilitate a mișcării utile a VEM, în cazul perturbațiilor mici, revine la:

$$[\partial(f_f + f_r) / \partial v] > 0 \quad (2.19)$$



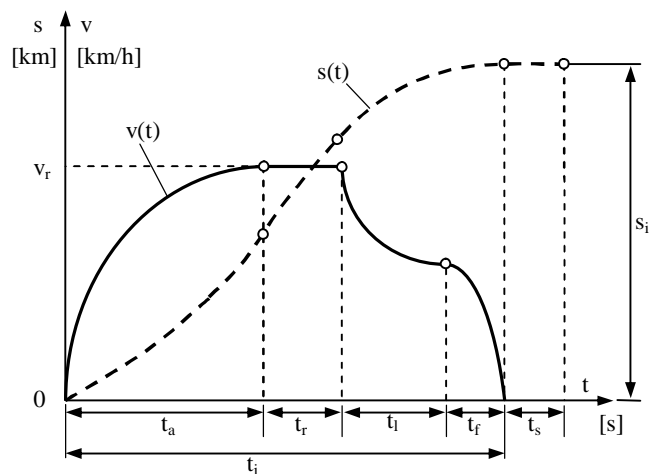
## 2.2. CICLURILE DE DEPLASARE UTILĂ ȘI DIAGrameLE DE MERS ALE VEM

Integrînd ecuația mișcării utile a VEM (2.1) sau (2.10) se obțin dependențele temporale  $v(t)$ ,  $s(t)$  ale vitezei și spațiului parcurs, a căror reprezentare grafică definește diagramele de mers ale VEM.

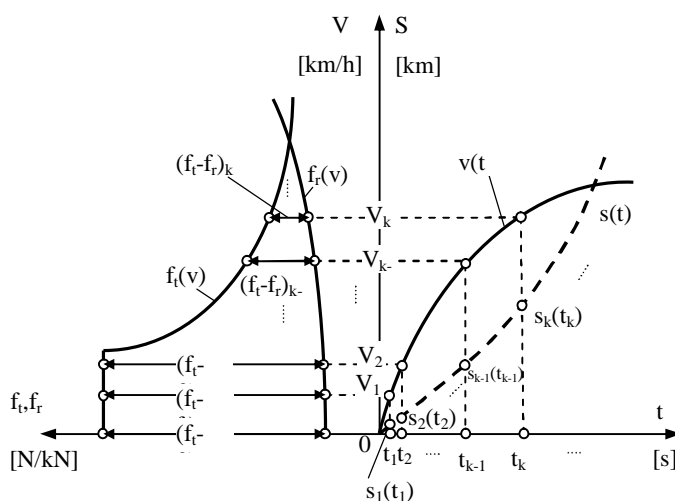
În vederea construirii diagramei de mers trebuie cunoscute caracteristicile de viteză ale forțelor care acționează asupra VEM în diversele regimuri ale mișcării sale utile: forța de tracțiune  $F_t(v)$  sau  $f_t(v)$ , forța de frînare  $F_f(v)$  sau  $f_f(v)$  și forța de rezistență totală la înaintare  $F_r(v)$  sau  $f_r(v)$ , primele două fiind determinate, în esență, de caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice de tracțiune, respectiv ale instalațiilor de frînare, și de caracteristicile sistemelor de reglare ale forței de tracțiune, respectiv de frînare. De obicei, diagramele de mers se determină pentru fiecare ciclu de deplasare utilă al VEM corespunzător parcursului dintre două stații succesive (numit interstație), începînd cu pornirea din repaus și terminînd cu frînarea pînă la oprire a VEM. Fazele unui ciclu de deplasare utilă corespunzător unei interstații sunt, deci (fig.2.1,a):

- faza de demaraj, de durată  $t_a$ , în care viteza de deplasare utilă a VEM crește de la zero la valoarea de regim  $v_r$  ecuația de mișcare a VEM corespunzătoare acestei faze este de forma (2.6);
- faza de mers cu viteză constantă, de durată  $t_r$  în care VEM se deplasează cu viteza de regim stabilizat  $v_r = \text{const.}$ ;
- faza de mers lansat, de durată  $t_l$ , în care are loc o decelerare a VEM, aflat în regim de „mers fără curent”; în această fază este valabilă ecuația de mișcare (2.7);

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



a)



b)

Fig. 2.1 Diagramele de mers ale VEM pe o interstație (a) și principiul construirii lor exemplificat pentru faza de demaraj a ciclului de deplasare utilă (b)

- faza de frânare, de durată  $t_f$ , când asupra VEM acționează forțele de frânare și de rezistență la înaintare, determinând, în final, oprirea VEM; ecuația de mișcare pentru această fază este (2.8).

Timpul total de mers pe interstație este, așadar:  $t_i = t_a + t_r + t_l + t_f$ . Uzual, pentru a obține informații cât mai complete din diagramele de mers, pe acestea se marchează și timpul de oprire  $t_s$  în fiecare stație a parcursului (fig.2.1,a).

Calculul diagramelor de mers se poate efectua prin integrarea grafo-analitică a ecuației mișcării utile a VEM, corespunzător fazelor ciclului de deplasare pe fiecare interstație a traseului parcurs de VEM. Astfel, în fig. 2.1,b este exemplificat principiul construirii diagramelor de mers  $v(t)$ ,  $s(t)$  pentru faza de demaraj a ciclului de deplasare utilă a VEM pe o interstație. Fiind cunoscute dependențele de viteză ale forțelor specifice de tracțiune  $f_t(v)$ , respectiv de rezistență totală la înaintare  $f_r(v)$ , în baze ecuației mișcării utile a VEM (2.10), particularizată pentru regimul de demaraj ( $f_f = 0$ ), se pot scrie relațiile aproximative, pe intervale de viteză  $\Delta v_k = v_k - v_{k-1}$ ,  $k=1, 2, \dots$ , suficient de mici:

$$(\Delta v_k / \Delta t_k) = \varphi(f_t - f_r)_{med,k} \quad (2.20)$$

$$\Delta s_k = v_{med,k} \Delta t_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.21)$$

de unde, ținând seama că  $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ ,  $\Delta s_k = s_k - s_{k-1}$ ,

$$(f_t - f_r)_{med,k} = (1/2)[f_t(v_k) - f_r(v_k)] + [f_t(v_{k-1}) - f_r(v_{k-1})] = (1/2)[(f_t - f_r)_k + (f_t - f_r)_{k-1}]$$

$v_{med,k} = (1/2)(v_k - v_{k-1})$ , rezultă șirurile de valori aproximative:

$$t_k = t_{k-1} + \frac{2(v_k - v_{k-1})}{\varphi[(f_t - f_r)_k + (f_t - f_r)_{k-1}]}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} s_k &= s_{k-1} + (1/2)(v_k - v_{k-1})(t_k - t_{k-1}) \\ &= s_{k-1} + \frac{v_k^2 - v_{k-1}^2}{\varphi[(f_t - f_r)_k + (f_t - f_r)_{k-1}]}, \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2.23)$$

definind punctele  $v_k(t_k)$  și  $s_k(t_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , ale diagramelor de mers corespunzătoare fazei de demaraj considerate (fig.2.1,b). În

relațiile de calcul anterioare (2.22), (2.23) diferențele  $(f_t - f_r)_k$  și  $(f_t - f_r)_{k-1}$  sunt evaluate simplu cu ajutorul graficelor  $f_t(v)$  și  $f_r(w)$ ,  $\rho$  este un parametru cunoscut al VEM iar valorile inițiale  $v_0$ ,  $t_0$  și  $s_0$  sunt nule.

Reprezentând diagramele de mers corespunzătoare tuturor interstațiilor traseului parcurs de VEM, se pot stabili indicatorii de viteză ai mișcării utile a VEM, ca de exemplu:

- viteza maximă  $v_{\max}$ , reprezentând valoarea maximă a vitezei atinse de VEM pe traseul considerat, adică:

$$v_{\max} = \max v_{r,k} \quad (2.24)$$

unde  $v_{p,k}$  definește viteza de regim stabilizat pe interstația  $k$ ;

- viteza medie pe întregul traseu  $v_{\text{med}}$  definită prin raportul dintre suma lungimilor  $s_{i,k}$  ale celor  $N$  interstații ale traseului și suma timpilor  $t_{i,k}$  de parcurgere a acestora, adică:

$$v_{\text{med}} = \frac{\sum_{k=1}^N s_{i,k}}{\sum_{k=1}^N t_{i,k}} \quad (2.25)$$

$v_{\text{med}}$  depinde, în principal, de modul de combinare a fazelor de mers în cadrul fiecărui ciclu de deplasare utilă a VEM dintr-o interstație;

- viteza comercială  $v_c$ , definită prin relația:

$$v_c = \frac{\sum_{k=1}^N s_{i,k}}{\sum_{k=1}^N (t_{i,k} + t_{s,k} + t_{o,k}) t_c} \quad (2.26)$$

unde  $t_{s,k}$  reprezintă timpii de oprire în stațiile intermediare ale traseului,  $t_{o,k}$ , timpii opririlor ocazionale de pe interstații (la semafoare datorită blocărilor de circulație etc.), iar  $t_c$  timpul de staționare în punctul terminus al traseului.

Diagramele de mers ale VEM se utilizează în calculele de tracțiune electrică la :

- trasarea curbelor de variație ale puterii electrice absorbite și curentului absorbit de VEM în funcție de timp sau de spațiul parcurs;
- determinarea consumului de energie electrică la deplasarea utilă a VEM;
- verificarea încălzirii motoarelor electrice de tracțiune și a instalațiilor din circuitul de forță al VEM;
- proiectarea instalațiilor fixe de tracțiune electrică etc.

### **2.3. FORȚA DE TRACȚIUNE LA VEM PROPULSATE CU MOTOARE ELECTRICE ROTATIVE**

Analiza procesului de formare, pe baza aderenței dintre roți și CR, a forței de tracțiune la VEM propulsată cu motoare electrice rotative necesită cunoașterea prealabilă a principiului constructiv al părții mecanice a acestor VEM.

Astfel, la VEM cu aderență la CR ghidată (constituită, uzual, din două șine metalice paralele), soluția constructivă, generalizată în prezent, a părții mecanice evidențiază trei subansambluri distincte (fig.2.2) :

- aparatul de rulare, care se sprijină pe CR și este alcătuit din roțile motoare din oțel 1 și osiile motoare 2, inclusiv cutiile de osii și accesoriile lor;
- boghiurile motoare 3, reprezentând cadre rigide independente din oțel, care se sprijină pe osiile motoare prin intermediul suspensiei primare elastice 4 (din arcuri lamelare sau

elicoidale, eventual în combinație cu blocuri de cauciuc) și al cutiilor de osii;

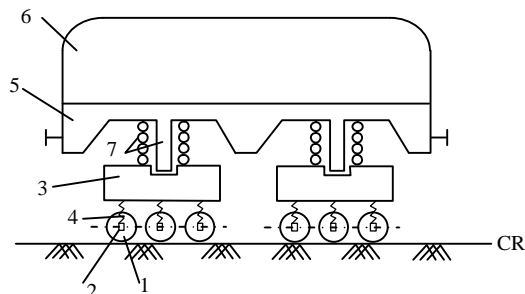


Fig. 2.2 Partea mecanică a unui VEM cu aderență la CR ghidată (de tip feroviar), . Schema de principiu

- șasiul 5, care suportă cutia (sau caroseria) 6 și se sprijină pe boghiuri prin intermediul suspensiei secundare 7 - elastice (cu arcuri, blocuri de cauciuc, perne de aer etc.) sau rigide (cu pivoți centrali) - astfel încât să existe posibilitatea de rotire a boghiurilor în plan orizontal față de cutie, pentru înscrierea ușoară în curbe a VEM.

**Observația 3.1.** Modul uzual de simbolizare al principiului constructiv al părții mecanice a oricărui vehicul cu aderență la CR ghidată este formula osiilor. Astfel numărul osiilor motoare cuprinse într-un aparat de rulare se simbolizează cu A pentru o osie, cu B pentru două osii, cu C pentru trei osii ș.a.m.d. Dacă osiile motoare aparțin unui boghiu, literele majuscule anterioare se marchează cu apostrof (A', B', C', ...). Dacă acționarea osiilor motoare este individuală (adică, fiecare osie motoare este antrenată de către un motor electric de tracțiune), majuscula care le desemnează se prevede cu indicele "0", iar dacă acționarea osiilor motoare este colectivă (de la un singur motor electric de

tracțiune, prin angrenaj), indicele respectiv se suprimă. În sfârșit, simbolizarea globală a structurii mecanice a unui VEM cu aderență la CR ghidată se face alăturând formulele osiilor corespunzătoare boghiurilor sale (de exemplu, VEM reprezentat în fig.2.2 are formula osiilor  $C_0' - C_0'$ , întrucât este prevăzut cu două boghiuri motoare, fiecare boghiu conținând trei osii motoare acționate individual).

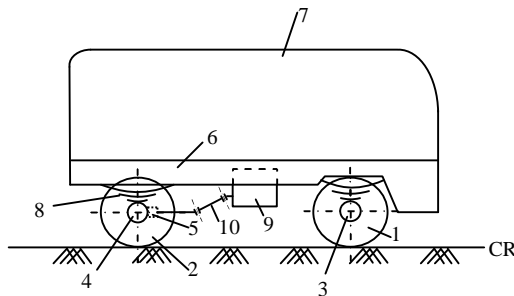


Fig. 2.3 Schema de principiu a părții mecanice a unui VEM cu aderență la CR neghidată (de tip rutier)

Structura părții mecanice a VEM cu aderență la CR neghidată (carosabil) este prezentată în fig.2.3. Se evidențiază următoarele subansambluri constitutive:

- aparatul de rulare, care se sprijină pe suportul nemetalic al CR și este alcătuit din roțile pneumatice, directoare (uzual, din față) 1 și motoare (uzual din spate) 2, montate la capetele a două punți (de forma unor grinzi masive de oțel), cea de direcție (din față) 3, respectiv cea motoare (din spate) 4; pe puntea din față este instalat „mecanismul de direcție” (cuprinzând volanul, angrenajul melc-rolă și sistemul de pârghii articulate) cu ajutorul căruia se realizează virarea roților din față, deci ghidarea VEM pe CR; pe puntea motoare (din spate) este instalată transmisia principală 5 (cuprinzând angrenajul reductor, diferențialul mecanic și axele

planetare), care permite turații diferite ale roților stânga - dreapta din puntea motoare (evitându-se, astfel, uzura pneurilor și consumul exagerat de energie electrică);

- șasiul 6, reprezentând o construcție sudată, executată din laminate și profile de oțel, suportă caroseria 7 a VEM și se leagă cu cele două punți prin suspensiile elastice 8 (cu arcuri lamelare); de șasiu este suspendat motorul electric de tracțiune 9, de la arborele căruia cuplul este transmis la roțile motoare, uzual, prin cuplajul cardanic dublu 10 și transmisia principală 5.

În continuare, se analizează procesul de formare a forței de tracțiune la VEM propulsate cu motoare electrice rotative. Se consideră, astfel, că roata motoare 1 (de masă  $m_R$  și rază exterioară  $r_R$ ), montată pe osia (puntea) motoare, interacționează prin contact mecanic, atât cu calea de rulare 2, cât și cu boghiul (șasiul) 3, alcătuind împreună un sistem de corpuri rigide supuse la legături (fig.2.4,a). După cum este cunoscut, studiul echilibrului unui asemenea sistem se poate face prin izolarea corpurilor rigide componente, introducerea tuturor forțelor și cuplurilor ce acționează asupra fiecărui corp rigid în parte și, în final, scrierea ecuațiilor corespunzătoare de echilibru.

Astfel, în fig.2.4,b s-au reprezentat cele trei corpuri rigide, izolate din sistemul considerat și acționate de forțe și cupluri date, respectiv provenite din legăturile interioare sau exterioare ale sistemului. Ca urmare, asupra roții motoare 1 se exercită (fig.2.4,b):

(1) în centrul O al roții, greutatea acesteia  $\overline{G}_R$ , ca forță dată, respectiv componentele verticală  $\overline{F}_v$  și orizontală  $\overline{F}_o$  ale forței echivalente acțiunii boghiului (șasiului) 3 asupra osiei (punții)



motoare în legătura (admisă fără frecare) corespunzătoare suspensiei elastice;

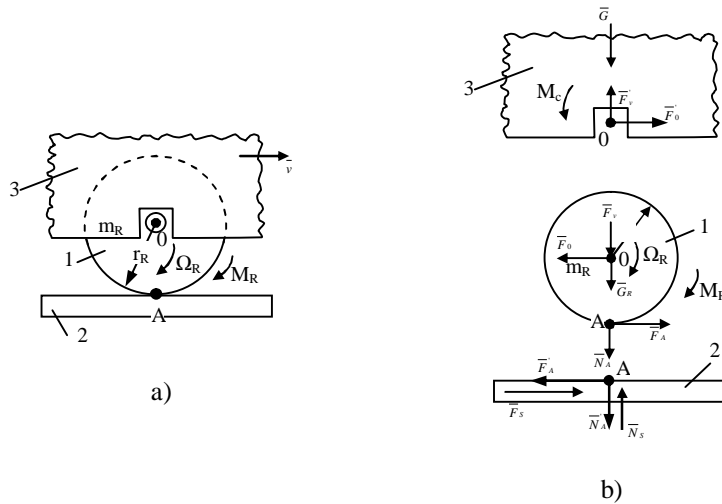


Fig. 2.4. Sistemul de corpuri rigide roată motoare-boghiu (șasiu)-CR supuse la legături (a) și metoda izolării corpurilor rigide aplicată acestui sistem (b)

(2) cuplul motor de moment  $M_R$ , care este transmis roții de motorul electric rotativ de tracțiune și îi imprimă acesteia o mișcare de rotație în jurul centrului O cu viteza unghiulară  $\Omega_R$ ;  
 (3) în punctul A de contact între roata motoare și CR, reacțiunea normală  $\vec{N}_A$  a CR asupra roții, caracteristică reazemului simplu și reacțiunea tangențială  $\vec{F}_A$ , de natura unei forțe de frecare de aderență ce se opune tendinței de deplasare a roții față de CR în planul tangent comun, sub influența cuplului motor  $M_R$ ; se neglijează cuplurile frecărilor de rostogolire și de pivotare la contactul roată-CR.

Asupra căii de rulare 2 acționează (fig.2,4,b):

(1) în legătura din punctul A de contact roată-cale, forțele de acțiune, normală  $\vec{N}'_A = -\vec{N}_A$  și tangențială  $\vec{F}'_A = -\vec{F}_A$ , ale roții

motoare, ca urmare a tendințelor de deplasare ale roții față de CR;

(2) reacțiunile normală  $\overline{N}_S = -\overline{N}'_A$  și tangențială  $\overline{F}_S = -\overline{F}'_A$  din legătura exterioară de fixare a CR în sol, care, în fapt, echilibrează forțele normală  $\overline{N}'_A$  respectiv tangențială  $\overline{F}'_A$  aplicate CR de roata motoare.

În sfârșit, asupra boghiului (șasiului) 3 se exercită (fig.2.4,b):

(1) ca forță dată, greutatea  $\overline{G}$  a părții suspendate a VEM ce revine roții motoare considerate;

(2) cuplul de reacție, de moment  $M_c$  egal cu al cuplului motor  $M_R$  (aplicat roții) și de sens contrar acestuia, tinzând să rotească boghiul (șasiul) în jurul centrului O al roții motoare; la VEM de tip feroviar, acest cuplu se echilibrează prin dispunerea pe lungimea boghiului a mai multor osii motoare cu acționare individuală;

(3) componentele, verticală  $\overline{F}'_v = -\overline{F}_v$  și orizontală  $\overline{F}'_0 = -\overline{F}_0$ , ale forței echivalente reacțiunii din legătura boghiului (șasiului) cu osia (puntea) motoare, corespunzătoare suspensiei elastice; forța  $\overline{F}'_v$  echilibrează greutatea  $\overline{G}$  ( $\overline{F}'_v = -\overline{G}$ ).

În condițiile anterioare, corpul rigid supus la legături cu frecare, reprezentat de roata motoare 1, efectuează o mișcare compusă dintr-o translație a centrului de greutate 0 și o rotație în jurul acestui centru. Datorită legăturilor roții motoare 1 cu calea de rulare 2 și cu boghiul (șasiul) 3, mișcarea de translație a roții are loc numai pe orizontală, viteza după această direcție a centrului O al roții fiind chiar viteza  $v = |\overline{v}|$  a VEM (fig.2.4). Ca urmare, ecuațiile diferențiale scalare care descriu mișcarea accelerată a roții motoare supuse legăturilor cu frecare sunt:

$$m_R (dv / dt) = F_A - F_0 \quad (2.27)$$

$$0 = N_A - F_V - G_R \quad (2.28)$$

$$J_R (d\Omega_R / dt) = M_R - F_A r_R \quad (2.29)$$

unde  $J_R$  reprezintă momentul de inerție al roții motoare în raport cu axa ei de rotație. Sistemul de ecuații (2.27) ÷ (2.29) fiind nedeterminat, se completează cu relații de natură geometrică între parametrii mișcării și cu condiții de existență pentru diferitele categorii de mișcări ale roții motoare în raport cu CR. Astfel, în regimul de tracțiune al VEM, o condiție de existență a mișcării de rostogolire fără alunecare a roții motoare pe CR corespunde inecuației

$$F_A \leq \psi_R N_A \quad (2.30)$$

de limitare a mărimii forței de frecare de aderență  $\bar{F}_A$  conform legilor frecării uscate a două corpuri rigide aflate în contact. În relația anterioară (2.30),  $\psi_R$  desemnează coeficientul (adimensional) de aderență al roții motoare considerate, iar mărimea

$$N_A = F_V + G_R = F_V' + G_R = G + G_R \quad (2.31)$$

conform (2.28) și fig.2.4,b, definește greutatea aderență a roții. Cazul de egalitate în (2.30) corespunde limitei de aderență dintre roata motoare și CR.

Deoarece valoarea maximă a forței de frecare de aderență  $\bar{F}_A$  este impusă prin condiția (2.30), rezultă din (2.29) că în regim de mișcare uniformă ( $d\Omega_R/dt=0$ ) momentul  $M_R$  al cuplului motor aplicat roții trebuie și el limitat pentru evitarea patinării (alunecării) roții motoare.

Cu referire la mișcarea de rostogolire a roții motoare pe CR în regimul de tracțiune al VEM, se observă din analiza fig.2.4,b că

asupra subsistemului de corpuri rigide roată-boghiu (șasiu) eliberat de legătura sa cu CR se exercită:

- un cuplu rezultat nul, întrucât  $M_R$  și  $M_C$  sunt egale și de sensuri contrare;

- o forță rezultantă nulă pe verticală, întrucât

$$N_A - F_v - G_R + F'_v - G = 0, \text{ conform (2.28) și (2.31);}$$

- o forță rezultantă nenulă pe orizontală, întrucât

$$F_A + F'_0 - F_0 = F_A \neq 0.$$

Așadar, subsistemul roată motoare-boghiu (șasiu), care aparține VEM, este acționat de o forță unică  $\overline{F}_A$ , având sensul mișcării utile a VEM și contribuind la propulsia VEM.  $\overline{F}_A$  apare ca o forță de legătură exterioară pentru subsistemul de corpuri rigide roată motoare-boghiu (șasiu), definită ca reacțiunea tangențială a CR asupra roții motoare, de natura unei forțe de frecare de aderență la contactul dintre roată și CR, forță a cărei mărime este limitată prin condiția (2.30). De asemenea,  $F_A$  este legată prin relația (2.29) de cuplul motor, de moment  $M_R$ , transmis roții motoare de către motorul electric rotativ de tracțiune.

La rândul ei, forța  $\overline{F}'_0 = -\overline{F}_0$  cu care roata motoare acționează asupra boghiului (șasiului) în sensul de mișcare utilă a VEN, contribuind, deci, la propulsia VEM, are, conform (2.27) și (2.29), valoarea:

$$F'_0 = F_A - m_R \frac{dv}{dt} = \frac{M_R}{r_R} - \left( m_R + \frac{J_R}{r_R^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (2.32)$$

unde s-a ținut seama că  $\Omega_R = v/r_R$ .

În baza celor precedente,  $\overline{F}_A$  este denumită forță tangențială da tracțiune, iar  $\overline{F}'_0$ , forță de tracțiune dezvoltată de roată. Valorile

acestor forțe coincid în regimul de mișcare uniformă a VEM ( $dr/dt=0$ ), adică:

$$F_A = F'_0 = M_R / r_R \quad (2.33)$$

Se observă din (2.29) și (2.32) că față de mărimile lor de regim permanent, date de (2.33), forțele de tracțiune  $\overline{F}_A$  și  $\overline{F}'_0$  diminuează în regim de viteză variabilă cu valoarea forțelor inerțiale ce intervin la accelerarea roții motoare.

Forța de tracțiune  $\overline{F}_t$  la VEM propulsate cu motoare rotative de tracțiune reprezintă suma forțelor tangențiale de tracțiune corespunzătoare tuturor roților motoare ale VEM.

**Observația 3.2.** Dacă VEM tractează o remorcă, asupra lui se exercită două forțe orizontale, de sensuri contrare:

- forța de tracțiune  $\overline{F}_t$ ,
- forța de reacțiune a remorcii, aplicată la aparatul de

cuplare (cârlig) dintre VEM și remorcă.

Cele două forțe având punctele de aplicație decalate pe înălțime, produc un așa-numit cuplu de cabraj, care tinde să descarce roțile motoare din partea anterioară a VEM și să le încarce pe cele din partea posterioară a VEM. În consecință, roțile motoare din față dispun de forțe de aderență mai reduse. La VEM. de tip feroviar, diminuarea cuplului de cabraj se realizează, practic:

- prin utilizarea articulației între boghiuri;
- prin coborârea cât mai aproape de șina CR a punctului de

antrenare a cutiei VEM de către boghiurile motoare, adică prin construirea VEM cu „tracțiune joasă”.

Prin generalizarea relațiilor (2.30) și (2.31), se poate scrie pentru întregul VEM :

$$F_t \leq G_a \psi \quad (2.34)$$

unde  $G_a$  definește greutatea aderentă a VEM (adică suma greutateilor aderente ale tuturor roților motoare aparținând VEM), iar  $\psi$  coeficientul global de aderență al VEM. Inecuația (2.34) constrânge forța de tracțiune aplicată VEM la valoarea maximă corespunzătoare limitei de aderență roată-cale, astfel încât să nu apară patinarea (alunecarea) roților motoare ale VEM pe CR.

Coeficientul de aderență  $\psi$  reprezintă o mărime adimensională cu valori medii subunitare, de  $0,1 \div 0,3$ , în cazul VEM cu roți metalice pe CR cu șine de oțel, respectiv de  $0,1 \div 0,75$  în cazul VEM cu roți pneumatice pe CR neghidată (carosabil).  $\psi$  se poate defini ca produsul a doi factori [3] :

- un coeficient fizic de aderență, determinat de starea instantanee a contactului dintre roțile motoare ale VEM și CR (construcția și materialul roților motoare, presiunea interioară a aerului din roțile pneumatice, starea de uzură a suprafețelor de rulare, uniformitatea CR, umiditatea și curățenia zonei de contact etc.); în cazul roților pneumatice, valorile acestui coeficient sunt superioare celor din cazul roților metalice, dar influența stării CR este mult mai puternică în primul caz decât în al doilea;

- un factor de corecție, determinat de particularitățile construcției mecanice a VEM (elasticitatea transmisiei cuplului motor, descărcare statică și dinamică a osiilor (punților) motoare jocul suspensiei etc.)

Cercetările experimentale au arătat că la creșterea vitezei de circulație a VEM coeficientul global de aderență  $\psi$  se micșorează. Ca urmare, s-au propus o serie de formule empirice de calcul al lui  $\psi$  în funcție de viteza  $v$  (în km/h) a VEM, ca, de exemplu, formula Curtius-Kniffler, utilizată de multe administrații de cale ferată, inclusiv C.F.R.:

$$\psi = \psi_0(8 + 0,1v)/(8 + 0,2v) \quad (2.35)$$

unde factorul  $\psi_0$  are valoarea 0,33 pentru VEM de c.a. și 0,18 ÷ 0,23 pentru VEM de c.c.

Din cele anterioare reiese că pentru realizarea unor forțe de tracțiune mari la VEM propulsate cu motoare electrice rotative sunt necesare (1) măsuri de creștere a forței de frecare de aderență la roțile motoare ale VEM prin:

- alegerea adecvată a materialelor roților și CR;
- construcția cât mai îngrijită, fără neregularități, a CR;
- curățirea mecanică sau chimică a benzilor de rulare;
- nisiparea șinelor metalice ale CR, controlată de pe VEM prin dispozitive electronice de protecție la patinare [52];
- modificarea corespunzătoare a presiunii aerului din roțile pneumatice (de exemplu, pentru o CR dură și uscată, reducerea presiunii interioare a aerului din pneuri determină creșterea forței de frecare de aderență a roților);
- diminuarea cuplului de cabraj;
- asigurarea elasticității sistemului de transmitere a cuplului motor la roți ;
- reducerea greutății părții nesuspendate a VEM și utilizarea unei suspensii avantajoase,

respectiv (2) măsuri de creștere a gradului de utilizare a forței de aderență prin:

- înlocuirea, pe cât posibil, a acționării individuale a roților motoare (la care patinarea unei roți este independentă de a celorlalte) cu acționarea lor colectivă (la care roata care a pierdut aderența nu poate patina, atât timp cât roțile cuplate mecanic cu ea nu au intrat în patinare);

- rigidizarea caracteristicii mecanice a motoarelor electrice de tracțiune în perioada patinării, pentru ca forța de tracțiune a roții motoare să fie, corespunzător, mai mare, evitându-se, astfel riscul ambalării roții ce patinează;

- reglarea continuă, și nu în trepte, a cuplului motoarelor electrice de tracțiune, în scopul menținerii forței de tracțiune a roților motoare la limita aderenței.

## 2.4. FORȚA DE TRACȚIUNE LA VEM PROPULSATE CU MOTOARE ELECTRICE LINIARE

Forța de tracțiune la VEM cu propulsie prin motor electric liniar se dezvoltă ca forță electromagnetică, dirijată în sensul mișcării utile a VEM și exercitată nemijlocit între armăturile plane, inductoare (primară) și indusă (secundară), a motorului liniar, una dintre armături fiind plasată pe VEM, iar cealaltă, de-a lungul căii de circulație. Ca urmare, această forță de tracțiune prezintă avantajul că se dezvoltă fără contact mecanic între VEM și calea de circulație și fără mecanisme intermediare de transmitere a mișcării.

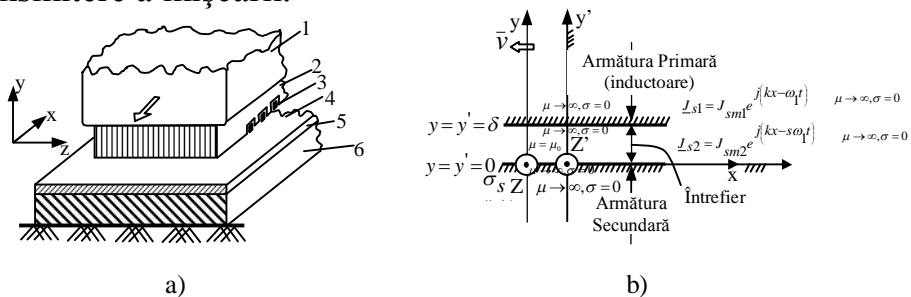


Fig. 2.5. Reprezentarea schematică a unui VEM echipat cu MAL (a) și modelul idealizat de câmp al MAL (b)

Varianta constructivă de motor electric liniar cel mai frecvent aplicată la propulsia VEM o constituie motorul asincron



liniar (MAL) cu inductorul (primarul) scurt, unilateral, montat pe VEM și indusul (secundarul) dispus de-a lungul căii de deplasare a VEM (fig.2.5,a). Astfel, solidar cu cutia 1 a VEM este miezul magnetic din tole 2 al primarului MAL, în creștăturile căruia este distribuită înfășurarea trifazată inductoare 3, care produce în întrefierul 4 un câmp magnetic progresiv (sau alunecător). Acesta din urmă induce curenți în armătura conductoare secundară de tip sendviș, cu placă subțire de aluminiu 5 pe fier masiv 6. Prin interacțiunea dintre câmpul magnetic progresiv, creat în întrefier de solenația primară, și curenții induși în secundar, rezultă o forță electromagnetică dirijată în lungul căii de circulație a VEM. Aceasta este forța de tracțiune la VEM echipat cu MAL. Ea pune în mișcare, prin reacție, armătura inductoare montată pe VEM, armătura indusă fiind fixată în calea de circulație.

Viteza liniară  $v = |\vec{v}|$  de deplasare a VEM în lungul căii este, evident, inferioară vitezei de sincronism  $v_1$ , a câmpului magnetic progresiv din întrefierul MAL. Ca urmare, se definește în cazul MAL (prin analogie cu motorul asincron rotativ) alunecarea  $s = (v_1 - v) / v_1$ .

Particularitățile constructive ale MAL (circuit magnetic deschis, dimensiuni longitudinale și transversale finite, așezare nesimetrică a celor trei faze ale înfășurării primare față de miezul magnetic al inductorului, grosime mult mai mare a armăturii induse comparativ cu adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic progresiv etc.) determină efecte (longitudinal, transversal, pelicular etc.) specifice MAL, având ca rezultat apariția unor forțe suplimentare, care pot perturba acțiunea forței de tracțiune la VEM echipat cu MAL.

În cele ce urmează, se face o estimare analitică relativ simplă a forței de tracțiune convenționale la VEM propulsate cu MAL pe baza unui model idealizat de câmp al MAL, în care se neglijează efectele specifice MAL. Conform acestui model, prezentat în, fig. 2.5,b, armăturile inductoare și indusă ale MAL se presupun de extensie infinită pe direcția de deplasare a VEM, iar miezul din tole al inductorului și jugul din fier masiv al indusului de tip sendviș sunt caracterizate de o permeabilitate magnetică infinită ( $\mu \rightarrow \infty$ ) și o conductivitate electrică nulă ( $\sigma=0$ ).

Neglijându-se efectul creșterii armăturii primare, înfășurarea trifazată inductoare este reprezentată printr-o pânză de curent plană, infinit extinsă pe suprafața netedă dinspre întrefier a armăturii primare. Densitatea acestei pânze de curent inductoare are o singură componentă, de forma unei progresive (sau alunecătoare)

$$J_{s1}(x,t) = J_{sm1} \sin(kx - \omega_1 t), k = \pi / \tau, \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.36)$$

unde  $J_{sm1}$  este amplitudinea densității pânzei de curent,  $\tau$ , pasul polar al înfășurării trifazate inductoare, iar  $\omega_1$ , pulsația tensiunii primare de alimentare. Unda progresivă a densității pânzei de curent inductoare se propagă cu viteza de sincronism  $v_1 = \omega_1 / k = 2 f_1 \tau$  (care, spre deosebire de motorul asincron rotativ, este independentă de numărul polilor magnetici ai armăturii inductoare) în sensul, pozitiv al axei x a unui referențial cartezian (x, y, z) solidar cu armătura primară (fig.2.5,b). Cu scopul simplificării calculelor, în continuare se adoptă pentru densitatea

pânzei de curent inductoare (2.36) expresia ei în complex:

$$\underline{J}_{S1} = J_{sm1} e^{j(kx - \omega_1 t)} \quad (2.37)$$

În ipotezele anterioare, câmpul magnetic inductor în întrefier rezultă progresiv (alunecător), având ca și sursa lui. reprezentată de pânza de curent (2.37), numai armonică fundamentală corespunzătoare lui  $\omega_1$ , aceeași viteză de sincronism  $v_1$  și același pas polar  $\tau$ . Ambele armături ale MAL se consideră de lățime suficient de mare, astfel încât câmpul magnetic progresiv din întrefier să poată fi admis plan-paralel, adică invariabil după axa  $z$  a unui referențial cartezian solidar cu oricare dintre armături (fig.2.5,b).

La rândul ei, placa de aluminiu a armăturii secundare de tip sendviș a MAL se idealizează, considerându-se de grosime neglijabilă în raport cu întrefierul  $\delta$  și cu jugul de fier masiv al indusului și de conductivitate electrică superficială echivalentă  $\sigma_3$  (fig. 2.5,b). Ca urmare, curenții induși de câmpul magnetic progresiv din întrefier în armătura secundară se pot reprezenta printr-o pânză de curent indusă, având densitatea de forma unei progresive

$$\underline{J}_{S2} = J_{sm2} e^{j(kx' - s\omega_1 t)} \quad (2.38)$$

transcrisă în complex într-un referențial cartezian  $(x, y, z)$  atașat armăturii secundare, cu mențiunea că într-un astfel de referențial pulsația nu mai este  $\omega_1$ , ci  $s\omega_1$  (fig. 2.5,b).

Conform modelului idealizat de câmp adoptat pentru MAL ce echiipează VEM, intensitatea câmpului magnetic progresiv este nenulă numai în întrefier, unde satisface ecuațiile în complex:

$$\text{div} \underline{B} = \mu_0 \text{div} \underline{H} = 0 \rightarrow \frac{\partial \underline{H}_x}{\partial x} + \frac{\partial \underline{H}_y}{\partial y} = 0 \quad (2.39)$$

$$\text{rot} \underline{H} = 0 \rightarrow \frac{\partial \underline{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \underline{H}_x}{\partial y} = 0 \quad (2.40)$$

care prin derivare succesivă în raport cu  $x$  și  $y$ , conduc la sistemul de ecuații Laplace pentru cele două componente, tangențială  $\underline{H}_x$  și normală,  $\underline{H}_y$  ale câmpului magnetic progresiv din întrefier:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_x}{\partial y^2} = 0 \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_y}{\partial y^2} = 0 \quad (2.42)$$

Ținând seama de expresia (2.37) a densității pânzei de curent inductoare ecuațiile diferențiale anterioare (2.41), (2.42) au soluții de forma:

$$\underline{H}_x(x, y) = (\underline{A}shky + \underline{B}chky)e^{j(kx - \omega_1 t)} \quad (2.43)$$

$$\underline{H}_y(x, y) = -j(\underline{A}chky + \underline{B}shky)e^{j(kx - \omega_1 t)} \quad (2.44)$$

în referențialul cartezian  $(x, y, z)$  solidar cu armătura inductoare.

Constantele complexe de integrare  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ , se determină din:

- condiția de salt a componentei tangențiale a intensității câmpului magnetic progresiv la interfața armătură inductoare-întrefier ( $y=\delta$ ), condiție scrisă în raport cu referențialul cartezian  $(x, y, z)$ :

$$\underline{H}_x(x, \delta) = \underline{J}_{S1} \quad (2.45)$$

rezultă:

$$\underline{A}shk\delta + \underline{B}chk\delta = \underline{J}_{S1} \quad (2.46)$$

- condiția de salt a componentei tangențiale a intensității câmpului magnetic progresiv la interfața armătură indusă-întrefier ( $y=0$ ) și legea inducției electromagnetice, pentru câmpuri de vectori bidimensionali, pe suprafața dinspre întrefier a armăturii induse, ambele ecuații fiind scrise în raport cu referențialul cartezian  $(x', y', z')$  atașat armăturii induse:

$$\underline{H}_x'(x', 0) = \underline{J}_{S2} = \underline{J}_{S2} e^{j(kx' - s\omega_1 t)} \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left( \frac{1}{\sigma_s} J_{s2} \right) = - \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \underline{H}_y(x', 0)) \quad (2.48)$$

de unde se obține:

$$\underline{B} = -j\sigma_s \mu_0 s v_1 \underline{A} \quad (2.49)$$

Din (2.46) și (2.49) rezultă:

$$\underline{A} = \frac{1}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} J_{sm1} \quad (2.50)$$

$$\underline{B} = \frac{-j\sigma_s \mu_0 s v_1}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} J_{sm1} \quad (2.51)$$

care introduse în (2.43) și (2.44) dau expresiile finale pentru componentele câmpului magnetic progresiv din întrefier

$$\underline{H}_x(x, y) = \frac{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chky}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{s1} \quad (2.52)$$

$$\underline{H}_y(x, y) = - \frac{\sigma_s \mu_0 s v_1 shky + jchky}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{s1} \quad (2.53)$$

Plecând de la această soluție de câmp, se pot evalua imediat forțele electromagnetice specifice MAL echipând VEM, prin utilizarea valorii vectoriale a tensorului stării fictive de tensiuni maxwelliene în câmp magnetic, corespunzător unității de suprafață a armăturii induse:

$$\bar{T}_m = \text{Re} \left\{ \mu_0 \underline{H} (\underline{H}^* \cdot \bar{u}_y) - \frac{\mu_0}{2} \bar{u}_y (\underline{H} \cdot \underline{H}^*) \right\} \quad (2.54)$$

unde se ține seama că normala exterioară la suprafața dinspre întrefier a indusului are sensul pozitiv al axei y, de versor  $\bar{u}_y$  și că vectorul complex  $\bar{H}$  al câmpului magnetic progresiv se evaluează la  $y=0$  și unde  $\text{Re}$  indică partea reală a unei mărimi complexe, iar asteriscul simbolizează complex conjugatul. În baza relațiilor (2.52), (2.53), expresia (2.54) se explicitează astfel:

$$\begin{aligned} \bar{T}_m = \operatorname{Re} \left\{ \mu_0 \underline{H}_x(x,0) \underline{H}_y^*(x,0) \bar{u}_x + \frac{\mu_0}{2} \left( \underline{H}_y(x,0) \underline{H}_y^*(x,0) - \right. \right. \\ \left. \left. - \underline{H}_x(x,0) \bullet \underline{H}_x^*(x,0) \right) \bar{u}_y \right\} = T_{mx} \bar{u}_x + T_{my} \bar{u}_y \end{aligned} \quad (2.55)$$

unde  $\bar{u}_x$  semnifică versorul axei  $x$  a sistemului cartezian  $(x,y,z)$ . Relația anterioară (2.55) arată că efectele dinamice ale câmpului magnetic progresiv din întrefierul MAL se manifestă pe două direcții în raport cu armăturile MAL: tangențial, prin forța de tracțiune, respectiv ortogonal, prin forța normală. Ambele forțe rezultă pulsatorii în timp, cu dublul frecvenței  $f_1$  a câmpului magnetic progresiv din întrefier.

Valoarea medie în timp a forței de tracțiune pe lungimea unui pas polar  $\tau$  și pe lățimea  $l$  a MAL este:

$$F_t = \frac{1}{2} \mu_0 \tau l T_{mx} = \frac{1}{2} \mu_0 \tau l \frac{\sigma_s \mu_0 s v_1 J_{sm1}^2}{sh^2 k \delta - j \sigma_s^2 \mu_0^2 s^2 v_1^2 ch^2 k \delta} \quad (2.56)$$

Forța de tracțiune se aplică, prin reacție, armăturii inductoare montate pe VEM și asigură, astfel, propulsia VEM în lungul axei  $x$  de propagare a câmpului magnetic progresiv din întrefier.

Relația (2.56) arată că valoarea medie a forței de tracțiune la VEM echipat cu MAL depinde de solenația inductoare, de conductivitatea electrică superficială echivalentă  $\sigma_s$  a plăcii secundare și de viteza de sincronism  $v_1$  de produsul dintre frecvența de alimentare  $f_1$  și pasul polar  $\tau$  al armăturii primare. La rândul ei, valoarea medie în timp a forței normale rezultante pe lungimea unui pas polar  $\tau$  și pe lățimea  $l$  a

MAL revine la expresia:

$$F_n = \frac{1}{2} \mu_0 \tau l T_{my} = \frac{1}{4} \mu_0 \tau l \frac{(1 - \sigma_s^2 \mu_0^2 s^2 v_1^2) J_{Sm1}^2}{sh^2 k \delta - j \sigma_s^2 \mu_0^2 s^2 v_1^2 ch^2 k \delta} \quad (2.57)$$

În relația anterioară (2.57) se evidențiază doi termeni : unul pozitiv, definind o forță de atracție, datorită interacțiunii fluxului magnetizant al primarului cu miezul masiv de fier al secundarului și unul negativ, definind o forță de repulsie, datorită interacțiunii solenației inductoare primare cu curenții induși secundari. Condiția ca forța normală de repulsie să o depășească pe cea de atracție, contribuind astfel la sustentarea VEM echipat cu MAL, rezultă din (2.57):

$$s > \frac{1}{\sigma_s \mu_0 v_1} \quad (2.58)$$

În general, forța normală rezultantă este de atracție în zona alunecărilor mici și de repulsie la alunecări mai mari (corespunzătoare regimului de tracțiune și/sau de frânare al VEM echipat cu MAL;

Din relațiile (2.56) și (2.57), prin raportare, se obține:

$$\frac{F_n}{F_t} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_s \mu_0 s v_1} - \sigma_s \mu_0 s v_1 \right) \quad (2.59)$$

adică la MAL echipând VEM, pentru o valoare dată a produsului  $\sigma_s \mu_0 s v_1$ , forța normală crește, în modul, direct proporțional cu forța de tracțiune.

## 2.5. FORȚELE DE FRÂNARE ALE VEM

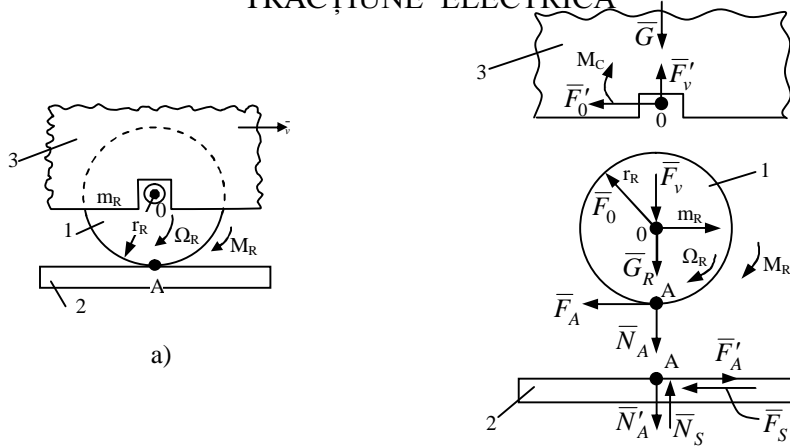
Forța de frânare a VEM reprezintă o forță controlabilă de către conductorul VEM, dirijată întotdeauna în sens opus mișcării utile a VEM. Ea poate fi dezvoltată (1) fie direct între VEM și calea de circulație, (2) fie pe baza aderenței dintre roțile VEM și CR, roțile (sau subansamblurile cuplate mecanic cu ele) fiind, la rândul lor, frânate prin mijloace interne ale VEM.

În primul caz, frânarea poate fi realizată, de exemplu, prin:

- forțe de frecare între patine aparținând VEM și șinele metalice ale CR;
- forțe electromagnetice între armături inductoare purtate de VEM și șinele metalice ale CR, parcurse de curenții turbionari induși;
- forțe electromagnetice între armăturile motorului, electric liniar de tracțiune, una din armături fiind solidară cu VEM, cealaltă fixată în calea de circulație.

În al doilea caz, frânarea se poate aplica numai la VEM cu roți, în procesul de formare a forței de frânare aderența dintre roțile frânate și CR având, ca și în cazul, forței de tracțiune la aceste VEM, un rol esențial. Pentru a analiza mai în detaliu acest proces se consideră o roată aparținând VEM căreia i se aplică printr-un mijloc intern oarecare (frânarea electrică a motorului electric de tracțiune cuplat cu roata, frânarea mecanică (cu saboți) a roții sau a subansamblurilor mecanice cuplate cu ea etc.) un cuplu de frânare de moment  $M_{Rf}$  având sens opus celui de rotație al roții (fig. 2.6).





Fir. 2.6. Sistemul de corpuri rigide roată frânată-boghiu (șasiu)-CR supuse la legături (a) și metoda izolării corpurilor rigide aplicată acestui sistem (b)

Se consideră ca și în cazul regimului de tracțiune că roata frânată 1 interacționează prin contact mecanic atât cu calea de rulare 2 cât și cu boghiul (șasiul) 3, alcătuind împreună un sistem de corpuri rigide supuse la legături (fig. 2.6,a). Aplicând metoda izolării corpurilor rigide, se obține configurația de forțe și cupluri din fig. 2.6,b. Ca urmare ecuațiile diferențiale scalare, care descriu mișcare decelerată a roții frâmate supuse la legături cu frecare sunt:

$$m_R \frac{dv}{dt} = -F_A + F_0 \quad (2.60)$$

$$0 = N_A - F_v - G_R \quad (2.61)$$

$$J_R \frac{d\Omega_R}{dt} = -M_{Rf} + F_A r_R \quad (2.62)$$

Relativ la mișcarea de rostogolire fără alunecare a roții frâmate pe CR, se observă din analiza fig. 2.6,b că subsistemul roată-boghiu (șasiu) aparținând VEM, este acționat de o singură forță,  $\vec{F}_A$ , dirijată în sens contrar mișcării utile a VEM, contribuind, deci, la frânarea VEM.  $\vec{F}_A$  apare ca o forță de legătură exterioară pentru subsistemul de corpuri rigide roată frânată-boghiu (șasiu), definită

ca reacțiunea tangențială a CR asupra roții frânate, de natura unei forțe de frecare de aderență la contactul roată-cale, forță a cărei valoare maximă este limitată prin condiția (2.30)

La rândul ei, forța  $\overline{F}_0' = -\overline{F}_0$  cu care roata frânată acționează asupra boghiului (sașiului) în sens contrar celui de mișcare utilă a VEM, contribuind, deci, la frânarea VEM, are, conform (2.60) și (2.62), valoarea:

$$\overline{F}_0' = \overline{F}_A + m_R \frac{dv}{dt} = \frac{M_{Rf}}{r_R} + \left( m_R + \frac{J_R}{r_R^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (2.63)$$

În baza celor anterioare, în regimul de frânare al VEM cu aderență la CR,  $\overline{F}_A$  este denumită forță tangențială de frânare, iar  $\overline{F}_0'$  forță de frânare dezvoltată de roată.

Forța de frânare  $\overline{F}_f$  a VEM cu aderență la CR reprezintă suma forțelor tangențiale de frânare corespunzătoare tuturor roților frânate ale VEM. Valoarea forței  $\overline{F}_f$  este și ea supusă unei restricții de tipul (2.34). Ca urmare, pentru realizarea unei forțe de frânare mari la VEM cu roți sunt necesare măsuri de creștere a forței de aderență roată frânată-CR și a gradului de utilizare a acestei aderențe. Asemenea măsuri sunt, practic, identice cu cele aplicate în regimul de tracțiune al VEM. De remarcat, că în cazul frânării mecanice a roților VEM, fiind posibilă blocarea acestora, gradul de utilizare a aderenței este mai redus decât în cazul frânării electrice.

**Observația 3.3.** Se poate arăta ușor că în regimul de frânare al unui VEM cu roți tractând o remorcă, asupra VEM acționează un cuplu de cabraj de sens contrar celui din regimul de tracțiune, tinzând să încarce roțile frânate din partea anterioară a VEM și să

le descarce pe cele din partea posterioară. În consecință, roțile frânate din spate dispun de forțe de aderență mai reduse.

## 2.6. FORȚELE DE REZISTENȚĂ LA ÎNAINȚAREA VEM

Forțele de rezistență la înaintarea VEM reprezintă forțe necontrolabile de pe VEM, al căror sens pozitiv este considerat sensul opus mișcării utile a VEM în lungul căii de circulație. Ca armare, în regimul de tracțiune al VEM (exceptând cazul când VEM coboară pante mari) forțele de rezistență la înaintare trebuie învinse de forța de tracțiune.

Forțele de rezistență la înaintarea VEM sunt determinate atât de interacțiunile VEM cu mediul înconjurător, cât și de interacțiunile diferitelor subansambluri ale VEM. În mod convențional, forțele de rezistență la înaintare se împart în:

- (1) principale, care intervin în toate regimurile de mers ale VEM, la deplasarea acestuia în linie dreaptă (aliniament) și pe plan orizontal (palier), și depind, în principal, de tipul constructiv al VEM și de viteza lui de circulație,
- (2), suplimentare, care intervin numai în condiții particulare de mișcare utilă a VEM și depind de caracteristicile de traseu ale căii de circulație, de factorii de mediu etc.

Forța de rezistență principală la înaintare  $\overline{F}_{r,p}$  (numită și forță de rezistență la mers în palier și aliniament) posedă, la rândul ei, două componente : una de rulare și alta aerodinamică.

Forța de rezistență de rulare înglobează:

- forța de rezistență datorită frecărilor din lagărele de pe osiile roților VEM (frecări mai mari la lagărele cu cuzineți decât la cele cu rulmenți);

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- forța de rezistență datorită pierderilor mecanice din motoarele electrice rotative de tracțiune și din sistemul de transmisie al cuplului la roți, dar numai în regimurile de mers lansat și de frânare neelectrică ale VEM (regimuri de „mers fără curent”);
- forța de rezistență datorită rostogolirii roților VEM pe CR (mai mare în cazul roților pneumatice);
- forța de rezistență datorită alunecării roții VEM pe CR (mai mare în cazul roților metalice pe șine);
- forțele de rezistență datorită șocurilor și oscilațiilor care se produc între aparatul de rulare al VEM și CR;
- forța de rezistență datorită frecărilor între captatorul de curent al VEM și LC.

Forța de rezistență aerodinamică este determinată de interacțiunea VEM cu aerul înconjurător, pe direcția axei longitudinale a VEM. Ea corespunde unei creșteri a presiunii aerului în partea anterioară a VEM, unei depresii în partea din spate a VEM și unei frecări pe suprafețele laterale ale VEM. Forța de rezistență opusă de aer este proporțională cu pătratul vitezei de deplasare utilă a VEM, având ponderea cea mai mare în cadrul rezistenței principale la mers pentru viteze peste  $60 \div 80$  km/h. Ea crește de aproximativ  $1,3 \div 2$  ori la deplasarea VEM în tunele, datorită efectului de pompare a aerului.

Din cele anterioare rezultă că forța de rezistență principală la mers depinde de numeroși factori, ceea ce face dificil calculul și prin metode teoretice. De aceea, valoarea forței  $\overline{F}_{r,p}$  se determină experimental (cu VEM în regim de mișcare uniformă sau de mers lansat), rezultatele fiind transcrise în formule empirice, valabile pentru diferite categorii de VEM. Uzual, se exprimă valoarea

forței specifice de rezistență principală la înaintare sub forma unui polinom de gradul doi în raport cu viteza mișcării utile a VEM:

$$f_{r,p} = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 \quad (2.64)$$

unde primii doi termeni corespund, în esență, forței de rezistență de rulare, iar ultimul, celei aerodinamice. În cazul locomotivelor electrice și diesel-electrice apar toți termenii în expresia (2.64), în cazul tramvaielor, troleibuzelor și metrourilor poate fi nul termenul de gradul întâi în raport cu viteza, iar în cazul locomotivelor electrice de mină, și VEM de transport uzinal se consideră, de obicei, numai termenul independent de viteză.

Între forțele de rezistență suplimentară la înaintare cele mai importante - atât prin ponderea pe care o au în regimurile de mers ale VEM, cât și prin frecvența cu care pot interveni, sunt forța de rezistență datorită declivităților  $\overline{F}_{r,d}$  și cea datorită curbelor  $\overline{F}_{r,c}$ .

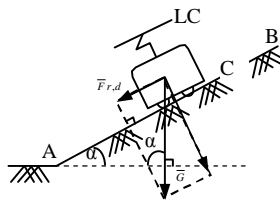


Fig. 2.7. Forța de rezistență la înaintare datorită declivităților

Pentru definirea forței de rezistență la înaintare datorită declivităților, se consideră o porțiune AB dintr-un traseu, înclinată față de planul orizontal cu unghiul  $\alpha$  și un VEM, de masă totală  $m$ , care se deplasează pe această porțiune (fig.2.7). Față de mișcarea pe plan orizontal, asupra VEM acționează, pe direcția mișcării utile, o forță suplimentară egală cu componenta greutateii VEM după această direcție. Ea constituie o forță de rezistență suplimentară la înaintarea VEM, de valoare pozitivă, dacă VEM urcă rampa AB, respectiv negativă, dacă VEM coboară panta BA

deci:

$$F_{r,d} = \pm mg \sin \alpha \quad (2.65)$$

Uzual, înclinarea axei căii de circulație se caracterizează prin declivitatea  $i$ , definită ca diferența de nivel între două puncte ale axei căii de circulație aflate la o distanță în plan orizontal de 1000 m și exprimată în promile ( $\text{‰}$ ) conform relației:

$$i(\text{‰}) = 1000 \tan \alpha \quad (2.66)$$

Întrucât unghiul  $\alpha$  are valori uzuale reduse, se poate considera  $\sin \alpha \cong \tan \alpha$ , ceea ce permite exprimarea valorii forței specifice de rezistență la înaintare datorită declivităților prin:

$$f_{r,d} = \pm i \quad / N / kN / \quad (2.67)$$

La deplasarea în curbe a VEM cu roți metalice pe șine intervine o forță de rezistență suplimentară la înaintare determinată de frecările produse prin:

- apăsarea buzei bandajului roților VEM pe partea laterală a capului șinei exterioare a CR;
- pivotarea boghiului față de șasiul cutiei VEM;
- alunecarea cel puțin a uneia din cele două roți de pe osie, datorită faptului că ele au de parcurs lungimi de drum diferite, în practică, valorile forței de rezistență datorită curbelor se stabilesc experimental, rezultatele fiind prezentate prin formule empirice, în care se ține seama, în principal, de raza de curbura  $\rho_c$  și de ecartamentul  $e$  al CR. Astfel, pentru VEM de tip feroviar sunt uzuale formulele lui Rock I (adoptate și de C.F.R.) pentru valorile forței specifice de rezistență la înaintare datorită curbelor :

$$f_{r,c} = \beta / (\rho_c - \gamma) \quad (2.68)$$

unde  $\beta$  și  $\gamma$  depind, la rândul lor, de  $\rho_c$ , de  $e$  și de tipul constructiv al VEM.

Forța de rezistență datorită curbilor nu apare, practic, la VEM cu roți pneumatice pe carosabil, întrucât este asigurată independența de mișcare a roților stânga-dreapta din puntea motoare a acestor VEM.

Alte forțe de rezistență suplimentară la înaintarea VEM sunt datorate vântului (care, în funcție de viteză, direcția și sensul său, poate modifica forța de rezistență aerodinamică), temperaturii scăzute a mediului ambiant (care determină creșterea densității aerului și a vâscozității lubrifianților din lagăre), instalațiilor de iluminat și de condiționare a aerului de pe VEM și remorcile sale (care sunt alimentate de la baterii de acumulare lucrând în tampon ca generatoare electrice cuplate pe osii) etc.

Mărima forței  $\bar{F}_r$  de rezistență totală la înaintarea VEM rezultă prin însumarea componentelor sale

$$F_r = F_{r,p} + F_{r,s} \quad (2.69)$$

sau în valori specifice (N/kN), conform relațiilor anterioare (2.64), (2.67), (2.68)

$$f_r = \left( a_0 \pm i + \frac{\beta}{\rho_c - \gamma} \right) + a_1 v + a_2 v^2 + \sum f_{r,s} \quad (2.70)$$

unde  $\sum f_{r,s}$  semnifică alte forțe de rezistență suplimentară la înaintare în afara celor datorate declivităților și curbilor. Din (3.70) rezultă că  $f_r$  este cel mai adesea pozitivă, dar poate deveni nulă sau chiar negativă în cazul când VEM coboară pante suficient de mari.

Diminuarea forțelor de rezistență la înaintarea VEM, având ca scop reducerea consumului de energie electrică și creșterea vitezei de deplasare utilă a VEM, se poate realiza prin aplicarea la

construcția și exploatarea VEM și căii de circulație a unor măsuri, ca de exemplu:

- reducerea greutății VEM prin utilizarea construcțiilor sudate și a aliajelor ușoare pentru structura mecanică;
- înlocuirea la VEM a lagărelor de alunecare cu cele de rostogolire ;
- construirea VEM cu formă aerodinamică
- alegerea adecvată a materialelor suprafețelor de rulare ale roților VEM și căii de circulație;
- execuția îngrijită a căii de circulație, adică fără neregularități, fără declivități mari, cu supraînălțarea căii în curbe, cu mărirea razelor de curbura etc.



## **CAPITOLUL 3**

# **INSTALAȚII FIXE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ**

## INTRODUCERE

Instalațiile fixe pentru tracțiunea electrică (IFTE) ale Căilor Ferate Române au fost construite în perioada 1965-1991, 78 de substații de tracțiune și peste 10.500 de kilometri de fir de contact desfășurat definesc în prezent dimensiunile acestor instalații. În țara noastră, proiectarea și construirea instalațiilor fixe pentru tracțiunea electrică au fost realizate în perioade destul de nefavorabile, caracterizate printr-o politică generală de austeritate, orientată spre realizarea de economii din ce în ce mai severe și timpi de execuție tot mai reduși. Exploatarea lor necorespunzătoare din anii '80 (prea intensă și marcată de întreruperi frecvente în alimentarea cu energie electrică a substațiilor de tracțiune) a contribuit la uzarea fizică și morală a aparaturii primar și secundar, care oricum era depășit întrucât fusese conceput pe baza tehnicii din anii '70. Așa cum s-a precizat în capitolul anterior, complexul de instalații fixe specifice tracțiunii electrice cuprinde: substații de tracțiune electrică, fideri de alimentare și de întoarcere, linie de contact, posturi de secționare, subsecționare și legare în paralel.

### 3.1. SUBSTAȚII DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ (SSTE)

SSTE reprezintă instalații fixe, care primesc energie electrică de c.a. trifazat (respectiv, monofazat) și de înaltă tensiune din rețeaua electromagnetică generală (respectiv, din cea proprie tracțiunii electrice), modifică natura curentului, dacă este cazul (în c.c. sau c.a. cu alt număr de faze) și reduc nivelul tensiunii, corespunzător necesităților tracțiunii electrice, iar, în final, distribuie energia electrică secțiunilor LC pentru alimentarea VEM neautonome.

Pentru ca investițiile în instalațiile fixe specifice tracțiunii electrice să fie cât mai reduse, trebuie satisfăcute următoarele condiții de bază referitoare la SSTE:

- racordarea SSTE la sistemul electromagnetic general să fie cât mai simplă;
- distanța dintre SSTE adiacente să fie cât mai mare și, în consecință, numărul SSTE instalate să fie cât mai mic;
- construcția, exploatarea și întreținerea SSTE să fie cât mai economice.

După sistemul de curent electric necesar în LC, se diferențiază următoarele tipuri de SSTE:

- SSTE de c.c.;
- SSTE de c.a. monofazat;
- SSTE de c.a. trifazat, care, confundându-se, practic, cu stațiile sistemului electroenergetic general, nu sunt specifice tracțiunii electrice.

## 3.1.1. SSTE de curent continuu

SSTE de c.c. sunt utilizate atât în tracțiunea electrică rutieră și subterană, cât și în cea feroviară cu LC de c.c. Ele sunt de tip interior și conțin în componența circuitelor lor primare următoarele subansambluri de bază, pe tipuri de echipamente electrice: instalație de înaltă tensiune, grup trafo-redresor de putere, instalație bară pozitivă, respectiv negativă și, eventual, grup trafo-invertor neautonom de putere.

În țara noastră, întreg acest echipament din furnitura SSTE de c.c. (exceptând grupul trafo-invertor neautonom de putere) este fabricat la întreprinderea „Electroputere” Craiova sub formă modulară și tipizată și poate fi acționat atât local (manual sau electric), cât și de la distanță, dintr-un post de comandă centralizată sau printr-o instalație de telecomandă.

*Instalația de înaltă tensiune* este destinată să primească c.a. trifazat din rețeaua electroenergetică generală ( $6 \div 110$  kV) și să îl furnizeze grupurilor trafo-redresoare de putere (și serviciilor auxiliare) din SSTE. Instalația posedă o structură celulară, cuprinzând, în principal conform (fig. 3.1):

- celule de linie corespunzătoare celor doi fideri (principal și de rezervă) de alimentare în înaltă tensiune a SSTE, compuse din compartimente în care se află montate: sistem trifazat dublu de bare colectoare de înaltă tensiune, separatoare tripolare acționate cu servomotor și prevăzute cu interblocaj electromecanic (Q1 și Q2, respectiv Q9 și Q10) și întreruptoare de înaltă tensiune debroșabile (Q11 și Q16);

- celule trafo pentru alimentarea grupurilor trafo-redresoare de putere, având, în plus față de celulele de linie, transformatoare de măsură - de curent (T1N și T5N) și de tensiune (T2N și T6N);

- celulă de măsurare și de cuplă, având echipament electric similar cu celulele anterioare (fără a fi prevăzute, însă, cu separatoare) și servind la măsurări electrice în înaltă tensiune și la trecerea de pe un sistem trifazat de bare colectoare pe celălalt.

*Grupurile trafo-redresoare de putere* se execută în număr de la unu la patru, putând funcționa în diferite combinații după o schemă de automatizare prestabilită.

În cazul SSTE de c.c. din fig. 3.1, un grup funcționează permanent, iar al doilea se introduce numai la o suprasarcină impusă de condițiile de trafic al VEM alimentate de la SSTE prin LC de c.c.

Aceste două grupuri sunt riguros identice (pentru a permite o interschimbabilitate totală), fiind alcătuite fiecare din:

- transformator trifazat de putere (T1, respectiv T2), coborâtor de tensiune ( $6 \div 110/0,4 \div 3$  kV) cu răcire naturală în ulei sau în aer (la SSTE de c.c. subterane); în funcție de tipul redresorului; din grup, cu 6 sau 12 pulsuri, transformatorul posedă o singură înfășurare secundară (fig. 2.2,a), respectiv două înfășurări secundare, defazate între ele cu 30 de grade electrice,

# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

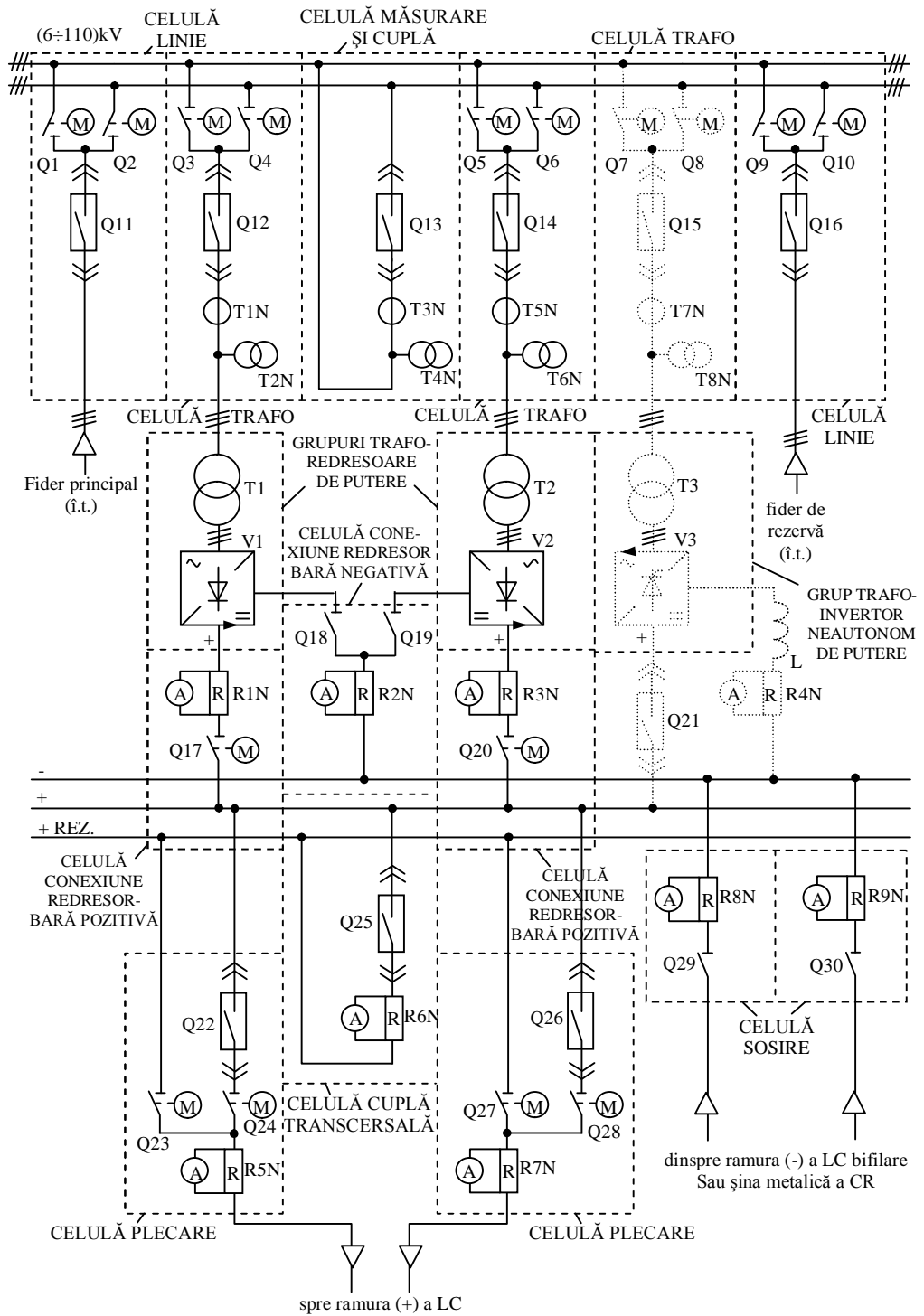


Figura 3.1. SSTE de c.c. Schema circuitelor primare

(una cu conexiune în stea, cealaltă în triunghi, având, corespunzător, numerele de spire în raportul  $1:\sqrt{3}$ , pentru a produce aceleași tensiuni între faze) (fig. 3.2,b);

- redresor necomandat în punte trifazată (V1, respectiv V2), echipat cu mai multe diode de putere montate în paralel pe fiecare braț al punții. Schemele de redresare frecvent utilizate sunt cu 6 pulsuri, corespunzător unei singure punți trifazate (fig. 3.2,a), respectiv cu 12 pulsuri, corespunzător unei perechi de punți trifazate, alimentate pe partea de c.a. de la cele două înfășurări secundare de transformator (una în stea, cealaltă în triunghi) și montate pe partea de c.c. în serie sau în paralel (uzual, printr-o bobină interfază (BIF), care absoarbe diferența dintre tensiunile instantanee de ieșire ale celor două punți redresoare, asigurând funcționarea independentă a acestora și limitând, totodată, curenții de scurtcircuit dintre ele) (fig. 3.2,b). Redresoarele necomandate în punte trifazată cu 6 sau 12 pulsuri sunt preferate în SSTE de c.c. deoarece: (1) posedă un factor de putere superior redresoarelor în punte comandată sau semicomandată (acestea consumând, în plus, putere reactivă de la rețeaua de alimentare); (2) pe partea de c.a. trifazat curenții de linie conțin numai componente armonice de ordinul  $6k \pm 1$ , respectiv  $12k \pm 1$ ,  $k = 1, 2, \dots$  (ceea ce înseamnă, formă de variație practic sinusoidală a curenților de linie), iar transformatorul trifazat de alimentare posedă un ridicat grad de utilizare și curenți fără componente continue în înfășurările secundare; (iii) pe partea de c.c., tensiunile redresate conțin numai componente armonice pare, preponderent de ordin multiplu de 6, respectiv de 12 (ceea ce înseamnă, pulsații reduse ca amplitudine ale tensiunilor redresate).

*Instalația barei pozitive se compune din (fig. 3.1):*

- celule de conexiune redresor-bară pozitivă, destinate să asigure legarea polilor pozitivi ai punților redresoare de sistemul dublu de bare pozitive (bară principală și bară de rezervă) al SSTE; celulele sunt echipate ca separatoare monopolare cu servomotor (Q17 și Q20) și șunturi de măsurare a c.c. (R1N și R3N);

- celule de plecare (spre ramura pozitivă a LC) de pe sistemul dublu de bare pozitive, prevăzute cu separatoare monopolare cu servomotor (Q23, Q24, Q27 și Q28), întreruptoare rapide de c.c. debroșabile (Q22, Q26) și șunturi de măsurare a c.c. (R5N, R7N);

- celulă de cuplă transversală, asemănătoare cu cele de plecare (fără a fi însă, echipată cu separatoare), destinată trecerii pe bara pozitivă de rezervă pentru alimentarea prin ea a unei plecări, oricând este cazul.

*Instalația barei negative cuprinde două tipuri de celule, fig.3.1:*

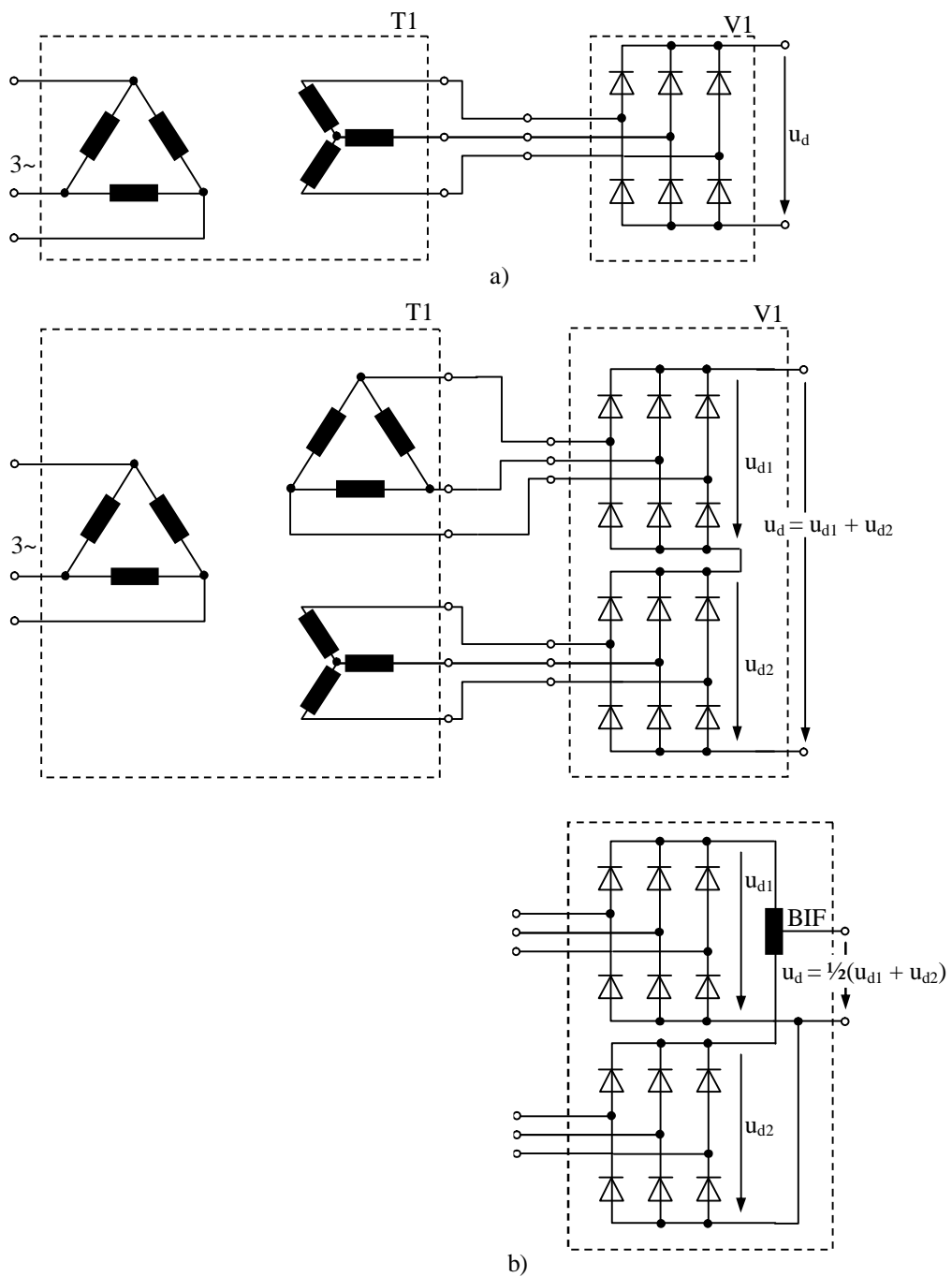
- celulă de conexiune redresor-bară negativă care asigură legătura dintre polii minus ai redresoarelor și bara negativă a SSTE, fiind echipată cu separatoare monopolare (câte unul pentru fiecare redresor, Q18, respectiv Q19) și un șunt general pentru înregistrarea curentului total pe bara negativă (R2N);

- celule de sosire (dinspre șina metalică a CR sau ramura negativă a LC bifilare de c.c.), prevăzute cu separatoare monopolare (Q29 și Q30) și cu șunturi de măsurare a c.c. (R8N și R9N).

SSTE de c.c. echipate exclusiv cu redresoare necomandate de putere și alimentând, prin LC, VEM neautonome putând frâna electric recuperativ, nu permit transferul energiei de frânare înapoi în sistemul electroenergetic general de c.a. trifazat. Ca urmare, energia recuperată prin frânarea în regim de generator a VEM este preluată de la LC de VEM din vecinătate, aflate în regim de tracțiune.



# TRACȚIUNE ELECTRICĂ



Există, totuși, situații - de exemplu, când în vecinătatea VEM care frânează recuperativ nu se află alte VEM în regim de tracțiune sau când mai multe VEM frânează simultan ca generatoare, debitând energie electrică pe același tronson al LC - care impun recuperarea energiei de frânare până în rețeaua trifazată de alimentare. În acest scop, anumite SSTE de c.c, sunt prevăzute suplimentar cu o celulă trafo distinctă (reprezentată punctat în fig. 3.1), având un echipament electric similar cu al celorlalte celule trafo ale instalației de înaltă tensiune și un *grup trafo-invertor neautonom de putere* format, în esență, din:

- transformator trifazat coborâtor de tensiune (T3) (reprezentat punctat în fig. 3.1), având, la fel ca T1 și T2 una sau două înfășurări secundare, defazate cu 30 de grade electrice între ele (una în stea, cealaltă în triunghi), în funcție de tipul invertorului neautonom (cu 6, respectiv 12 pulsuri) pe care îl deservește; raportul de transformare și tensiunea de scurtcircuit ale lui T3 sunt astfel alese, încât energia de frânare să fie transferată din rețeaua de c.c. în cea de c.a. trifazat numai atunci când această energie nu poate fi utilizată în tronsonul LC de c.c. în care ea a fost generată;

- invertor neautonom de putere, în punte trifazată cu tiristoare (V3) (reprezentat punctat în fig. 3.1), montat în cruce cu redresoarele de putere V1, V2 din SSTE; V3 prezintă, uzual, o schemă în punte trifazată cu 6 sau 12 pulsuri, similară celei a redresoarelor V1, V2 (fig. 3.2), cu deosebirea că diodele de putere sunt înlocuite prin tiristoare; funcționarea lui V3 în regim de invertor neautonom cu conducție permanentă este asigurată prin unghiul de comandă mai mare decât  $90^\circ$  al tiristoarelor punții trifazate (cu precizarea că în cazul schemei cu 12 pulsuri, cele două punți trifazate, conectate în serie sau paralel, sunt comandate simultan) și prin curentul de circulație care se stabilește între invertorul neautonom V3 și redresoarele (sau redresorul) cu diode V1 și/sau V2 din

SSTE, ca urmare a diferenței dintre valorile instantanee ale tensiunilor celor două tipuri de convertoare statice, pe partea lor de c.c.; întrucât această diferență reprezintă o tensiune sinusoidală, curentul de circulație creat de ea rezultă pulsatoriu și trebuie netezit prin introducerea unei bobine de reactanță (L) (reprezentată punctat în fig. 3.1) pe partea de c.c. a lui V3; curentul de circulație, având în regim normal de funcționare o valoare relativ redusă, determină pe partea de c.a. a lui V3 practic, un curent reactiv prin transformatorul corespunzător T3.

În regimul de tracțiune al VEM alimentate prin LC de la SSTE de c.c., redresorul cu diode V1 (și/sau V2) din SSTE este parcurs atât de curentul electric de tracțiune (necesar motoarelor de propulsie a VEM), cât și de curentul de circulație, în vreme ce prin inverterul neautonom V3 trece numai curentul de circulație, asigurându-i conducția neîntreruptă.

În regimul de frânare electrică recuperativă al VEM alimentate prin LC de la SSTE de c.c., atâta timp cât LC poate absorbi energia de frânare, tensiunea crescândă din LC determină descărcarea redresorului necomandat V1 (și/sau V2) din SSTE. Din momentul în care tensiunea continuă din LC depășește valoarea tensiunii de mers în gol a redresorului V1 (și/sau V2) din SSTE, acesta se blochează, iar inverterul neautonom V3 preia curentul de sarcină, transferând energia de frânare din rețeaua de c.c. în cea de c.a. trifazat.

Dimensionarea corectă a inverterului neautonom de putere din SSTE de c.c. presupune cu necesitate o bună conlucrare între producătorul de VEM alimentate de la LC de c.c. (și având posibilitatea frânării electrice recuperative) și furnizorul de echipament electric pentru SSTE de c.c., în scopul asigurării compatibilității între instalațiile fixe și cele mobile de tracțiune electrică.

Atât pentru personalul de deservire al unei SSTE de c.c., cât și pentru echipamentul electric aferent acesteia, trebuie asigurată protecția

coordonată și selectivă, în primul rând, împotriva supracurenților (suprasarcini și scurtcircuite), supratensiunilor și punerilor la pământ. Astfel, protecția la scurtcircuite interne a redresoarelor de putere cu diode (respectiv, a invertorului neautonom de putere cu tiristoare) este realizată prin siguranțe fuzibile ultrarapide asociate fiecărei diode (respectiv, tiristor). Numărul diodelor în paralel pe o ramură a punții trifazate permite funcționarea în continuare a redresorului (la sarcină redusă) în cazul arderii unei siguranțe ultrarapide, până la crearea posibilităților de înlocuire a siguranței respective. În cazul arderii a două sau mai multe siguranțe ultrarapide, un dispozitiv electronic de detecție selectivă a arderii fuzibilelor provoacă declanșarea întreruptorului de înaltă tensiune din celula trafo corespunzătoare.

Scurtcircuitele și suprasarcinile anormale din rețeaua de c.a., trifazat și de la bornele redresoarelor de putere (respectiv, ale invertorului neautonom de putere) din SSTE sunt eliminate tot prin întreruptorul de înaltă tensiune, iar cele din rețeaua de c.c, prin întreruptoarele rapide de c.c ale instalației barei pozitive. O protecție suplimentară la suprasarcini anormale este reprezentată de termistoarele din canalele de ventilație ale redresoarelor de putere din SSTE. Fiecare redresor de putere este, de asemenea, echipat cu un releu de curent invers, care împiedică alimentarea inversă, în caz de defect, de la redresoarele funcționând în paralel cu cel considerat.

Protecția la supratensiuni se aplică, în principal, grupurilor trafo-redresoare de putere (respectiv, grupului trafo-invertor neautonom de putere) din SSTE, fiind realizată prin circuite R-C serie racordate :

- la bornele fiecărui braț al punții trifazate cu diode (respectiv, tiristoare), pentru protecția contra supratensiunilor de comutație;
- între fazele înfășurării secundare a fiecărui transformator de putere și între bornele de c.c. ale redresoarelor de putere (respectiv ale

inverterului neautonom de putere), pentru protecția împotriva supratensiunilor de manevră (datorate cuplajului capacitiv între înfășurările transformatorului de putere și în raport cu pământul, la cuplarea transformatorului, respectiv datorate întreruperii curentului magnetizant al transformatorului la deconectarea în gol a acestuia) și a supratensiunilor provenind din rețeaua trifazată de alimentare și din cea de c.c. de tracțiune.

În sfârșit, pentru protecția contra atingerilor și punerilor la pământ servesc voltmetrul cu contact, care sesizează tensiunea între polul negativ al redresorului de putere (sau inverterului neautonom) din SSTE de c.c. și pământ, respectiv releul maximal de curent, care sesizează curentul de defect între scheletul metalic al redresorului (sau inverterului neautonom) și pământ. În cazul SSTE de c.c. feroviare, metropolitane și de tramvai, celulele componente ale instalației barei pozitive trebuie montate pe suporti izolanti pentru protecția personalului de deservire al SSTE.

SSTE de c.c. sunt avantajoase prin aceea că:

- se racordează direct la rețeaua electroenergetică generală de înaltă tensiune (uzual, racordarea SSTE de c.c. la stațiile sistemului electroenergetic general se realizează prin intermediul unei LEA proprii de înaltă sau medie tensiune, astfel încât să fie posibilă alimentarea de la două capete a fiecărei SSTE de c.c.);

- prezintă un randament energetic ridicat la toate sarcinile (mai ales dacă sunt echipate cu inverter neautonom de putere) și se pretează ușor la automatizare.

Ca principale dezavantaje:

- SSTE de c.c. sunt complicate, costisitoare și cu exploatare anevoioasă;

- pentru ca în LC curentul continuu, având valori ridicate (de

ordinul  $10^3$  A), să nu provoace căderi mari de tensiune, se impun distanțe reduse între SSTE de c.c. adiacente ( $2\div 10$  km, în cazul STE urbane, respectiv  $15\div 40$  km, în cazul STE feroviare), ceea ce înseamnă creșterea numărului SSTE de c.c. ce trebuie instalate, cu consecința unor costuri de investiție ridicate;

- tensiunea redresată de ieșire din SSTE de c.c. prezintă armonici parazite, preponderent de ordin multiplu de 6, care pot provoca perturbații electromagnetice și zgomote în circuitele cuplate conductiv sau inductiv cu circuitul electric de tracțiune (reducerea acestor efecte negative se poate obține prin racordarea la barele SSTE de c.c. a unor filtre de absorbție, constând din circuite rezonante de tip L-C, acordate pe frecvențele armonicilor dominante).

### 3.1.2. SSTE de curent alternativ monofazat

SSTE de c.a. monofazat sunt utilizate cu precădere în tracțiunea electrică feroviară, dar recent, și în cea minieră cu VEM neautonome.

Ele sunt de tip exterior și prezintă trei variante constructive de bază:

- *SSTE de c.a. monofazat de frecvență joasă* ( $16\frac{2}{3}$  sau 25 Hz), alimentate direct din sistemul electroenergetic general trifazat de înaltă tensiune; aceste SSTE sunt convertizoare de fază (din tri- în monofazat) și de frecvență (de la 50 la  $16\frac{2}{3}$  Hz, respectiv de la 60 la 25 Hz), necesitând pe lângă transformatoare de putere (coborâtor de tensiune, respectiv tampon și ridicător de tensiune) și agregat rotativ compus din motor sincron trifazat și alternator monofazat (fig. 3.3); fiind foarte complicate ca structură, pretinzând suprafețe de amplasare mari și având randament energetic scăzut, ele nu se mai extind;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

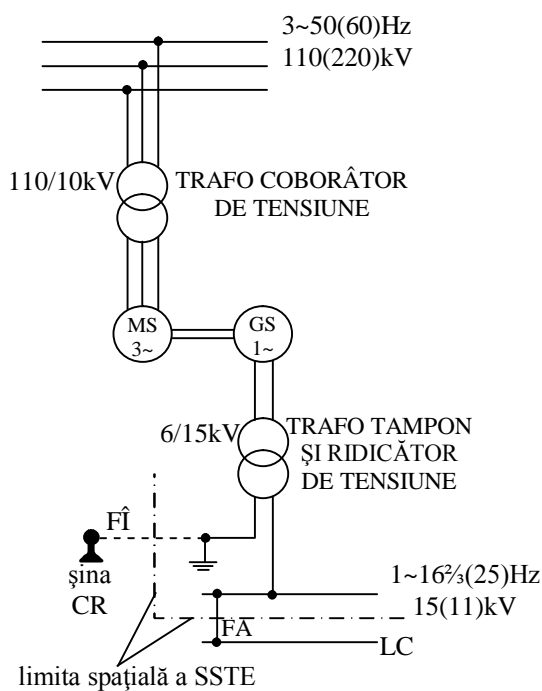


Fig. 3.3. Schema de principiu a SSTE de c.a. monofazat de frecvență joasă, convertizoare de fază și frecvență.

– *SSTE de c.a. monofazat de frecvență joasă* ( $16 \frac{2}{3}$  sau 25 Hz), alimentate dintr-un sistem electroenergetic monofazat de înaltă tensiune propriu tracțiunii electrice; aceste SSTE reprezintă cea mai simplă soluție constructivă, necesitând numai transformator de putere monofazat, coborâtor de tensiune (fig. 3.4);

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

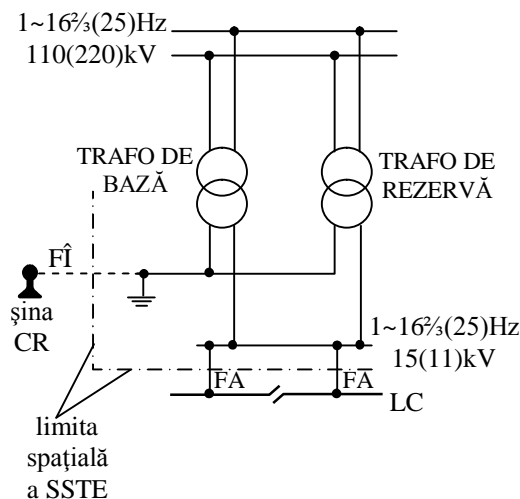


Fig. 3.4. Schema de principiu a SSTE de c.a. monofazat de frecvență joasă, alimentată dintr-un sistem electroenergetic monofazat propriu tracțiunii electrice.

*SSTE de c.a. monofazat de frecvență industrială (50 sau 60 Hz),* alimentate direct din sistemul electroenergetic general trifazat de înaltă tensiune (de exemplu, SSTE feroviare din țara noastră); aceste SSTE sunt la fel de simple ca și cele anterioare, fiind echipate cu transformator de putere monofazat (coborât de tensiune) conectat simplu între două faze ale sistemului electroenergetic trifazat de alimentare (fig. 3.5).

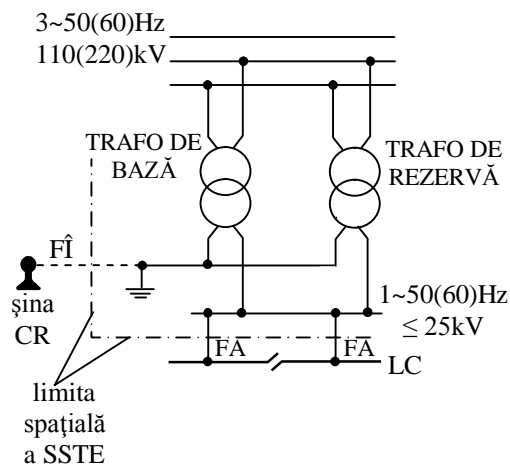


Fig. 3.5. Schema de principiu a SSTE, de c.a. monofazat, de frecvență industrială, cu transformator de putere monofazat legat simplu.



STE în c.a. monofazat de frecvență industrială, înglobând SSTE cu transformator de putere monofazat legat simplu (consumator dezechilibrat) și VEM echipate cu convertoare statice de putere (consumator deformant), constituie, în ansamblul său, un receptor complex permanent dezechilibrat și deformant pentru sistemul electroenergetic trifazat de alimentare, căruia îi provoacă un regim permanent nesimetric și nesinusoidal de tensiuni și curenți cu efecte energetice defavorabile. ( cap. 9). Estimarea acestor efecte este posibilă dacă se au în vedere circulațiile puterilor active și reactive pe fiecare secvență a componentelor simetrice și pe fiecare armonică în parte. Astfel, receptorul monofazat și deformant de tracțiune electrică absoarbe din sistemul electroenergetic putere activă și reactivă numai pe secvența directă a armonice fundamentale, consumă o parte din puterea primită, iar diferența o desimetrizează, o degradează și o retrimite în sistem ca putere activă și reactivă pe secvența inversă și homopolară a armonice fundamentale, respectiv pe toate secvențele armonicilor superioare. Corespunzător, factorul de putere global al receptorului monofazat și deformant de tracțiune electrică este decompozabil în trei termeni, care pun în evidență efectele energetice ale consumurilor tehnologice suplimentare datorate circulațiilor separate ale puterilor active, simetrică (pe secvența directă a fundamentalei), nesimetrică (pe secvența inversă și homopolară a fundamentalei), respectiv reziduală (pe toate secvențele armonicilor superioare). Problema ameliorării acestui factor de putere global a fost revigorată, în ultimul timp ca urmare a interesului crescând pentru asigurarea calității energiei electrice din sistemul electroenergetic. Problema se poate rezolva, în principiu, pe trei căi specifice:

- compensarea puterii reactive pe secvența directă a armonice fundamentale;
- echilibrarea sarcinii monofazate de tracțiune electrică pentru

armonica fundamentală;

- filtrarea armonicelor superioare;

din care primele două sunt operante la nivelul SSTE de c.a. monofazat (de frecvență industrială), iar ultima, la nivelul consumatorului deformant reprezentat de VEM neautonom echipat cu convertoare statice de putere.

În scopul echilibrării sarcinii monofazate de tracțiune electrică pentru armonica fundamentală, la nivelul SSTE de c.a. monofazat de frecvență industrială se pot aplica următoarele metode:

- *echilibrarea intrinsecă* (aplicată, de exemplu, în electrificarea feroviară din Marea Britanie), constând în schimbarea ciclică succesivă a modului de racordare al SSTE de c.a. monofazat adiacente la diferite faze ale sistemului electroenergetic trifazat; în cazul ideal al încărcării egale a tronsoanelor LC alimentate de SSTE, se obține, pentru un număr de trei (sau multiplu de trei) SSTE, o echilibrare completă a sarcinii monofazate de tracțiune electrică; metoda nu permite funcționarea în paralel a SSTE adiacente cu transformatoare de putere monofazate legate simplu;

- *echilibrarea locală*, constând în înlocuirea în SSTE de c.a. a transformatorului de putere monofazat legat simplu, fie cu două transformatoare de putere monofazate conectate, uzual, în V/V (fig. 3.6, a) (metodă aplicată, de exemplu, în electrificarea feroviară din țara noastră), fie cu un transformator de putere trifazat cu încărcare pe două faze (fig. 3.6, b) (metodă aplicată, de exemplu, în U.R.S.S. pe magistrale feroviare lungi cu tracțiune electrică de mare putere); la ambele metode se impune secționarea LC în dreptul SSTE printr-o zonă neutră (fig. 3.6), iar echilibrarea realizată este parțială și depinde de încărcarea relativă a celor două înfășurări secundare de transformator de putere din

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

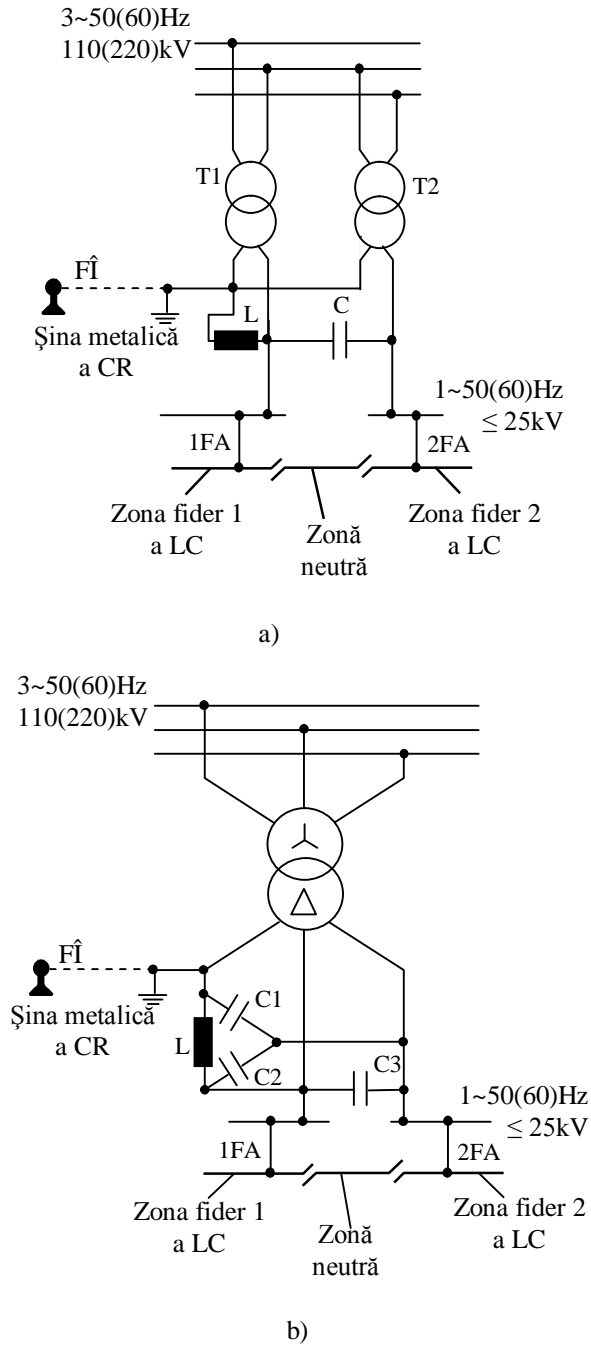


Fig. 3.6. Schema de principiu a SSTE de c.a. monofazat, de frecvență industrială, cu două transformatoare de putere monofazate (T1, T2) conectate permanent în V/V (a), respectiv cu transformator de putere trifazat cu încărcare pe două faze (b).

SSTE, prin care se alimentează zonele fider corespunzătoare ale LC (fig. 3.6); de asemenea, ambele metode utilizează transformatoare de putere mono, respectiv trifazate, din seria curentă și permit funcționarea în paralel a SSTE învecinate; metoda cu transformator de putere trifazat prezintă dezavantajul supradimensionării cu peste 20% a transformatorului, impusă de încărcarea pe două faze și de existența curenților de circulație între SSTE adiacente;

- *echilibrarea extrinsecă*, constând în utilizarea unor grupuri de bobine de reactanță și baterii de condensatoare, conectate în circuitele înfășurărilor secundare ale transformatoarelor de putere din SSTE de c.a. monofazat (de exemplu, grupurile LC din fig. 3.6, a și L, C1, C2, C3 din fig. 3.6, b); bateriile de condensatoare C din fig. 3.6, a, respectiv C3 din fig. 3.6, b, pot fi proiectate să asigure, totodată, și compensarea puterii reactive corespunzătoare armonice fundamentale.

Toate metodele anterioare de echilibrare a sarcinii monofazate de tracțiune electrică realizează, în fapt, o simetrizare parțială a tensiunilor și curenților armonice fundamentale în sistemul electroenergetic trifazat. Ca atare, alegerea optimă a metodelor de echilibrare a sarcinii monofazate de tracțiune electrică trebuie să se bazeze pe calculul distribuției în sistemul electroenergetic al curenților și tensiunilor de secvență directă, inversă și homopolară relativ la armonica fundamentală [11].

Se recomandă, de asemenea, ca metodele de echilibrare ale sarcinii monofazate de tracțiune electrică să fie combinate în vederea creșterii eficienței lor. O astfel de soluție practică (uzuală, de exemplu, în electrificarea feroviară românească) constă în instalarea unui grup de 2-3 SSTE adiacente de c.a. monofazat, având transformatoare de putere monofazate legate simplu la

aceleași două faze ale sistemului electroenergetic, după care se instalează o SSTE cu transformatoare de putere monofazate conectate permanent în V/V, care modifică perechea fazelor de racordare la sistemul electroenergetic pentru următorul grup de 2-3 SSTE adiacente cu transformatoare monofazate legate simplu ș.a.m.d.

Dezvoltarea sistemelor electroenergetice, caracterizată prin creșterea puterii instalate în centrale electrice și a puterii de scurtcircuit, a creat posibilitatea utilizării curente a SSTE de c.a. monofazat, de frecvență industrială, cu transformator de putere monofazat legat simplu. Se descrie, în continuare, echipamentul electric al circuitelor primare ale unei astfel de SSTE de c.a. monofazat.

Conform fig. 3.7, se evidențiază următoarele subansambluri de bază:

- celule de linie (trifazate) de înaltă tensiune pentru racordul (dublu) de alimentare prin LEA de pe barele unei stații a sistemului electroenergetic general; aceste celule sunt prevăzute cu separatoare tripolare cu cuțit de punere la pământ, acționate cu servomotor ( $Q1 \div Q4$ );
- sistem trifazat (simplu) de bare colectoare (BCT) de înaltă tensiune, montat pe izolatori suport de tip exterior;
- celulă (trifazată) de măsurare în înaltă tensiune, prevăzută cu separatoare tripolare (cu cuțit de punere la pământ, acționate cu servomotor) ( $Q5 \div Q6$ ), transformator de măsură de tensiune (T1N) și descărcător cu rezistență variabilă (F1) (pentru protecția împotriva supratensiunilor externe);
- celule trafo (bifazate) de înaltă tensiune, racordate la aceeași pereche de faze ale sistemului trifazat de alimentare și echipate cu separatoare bipolare ( $Q7, Q9$ ), întreruptoare automate bipolare cu ulei puțin ( $Q8, Q10$ ) (pentru protecția la scurtcircuite și suprasarcini) și transformatoare de curent (T2N, T3N);

# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

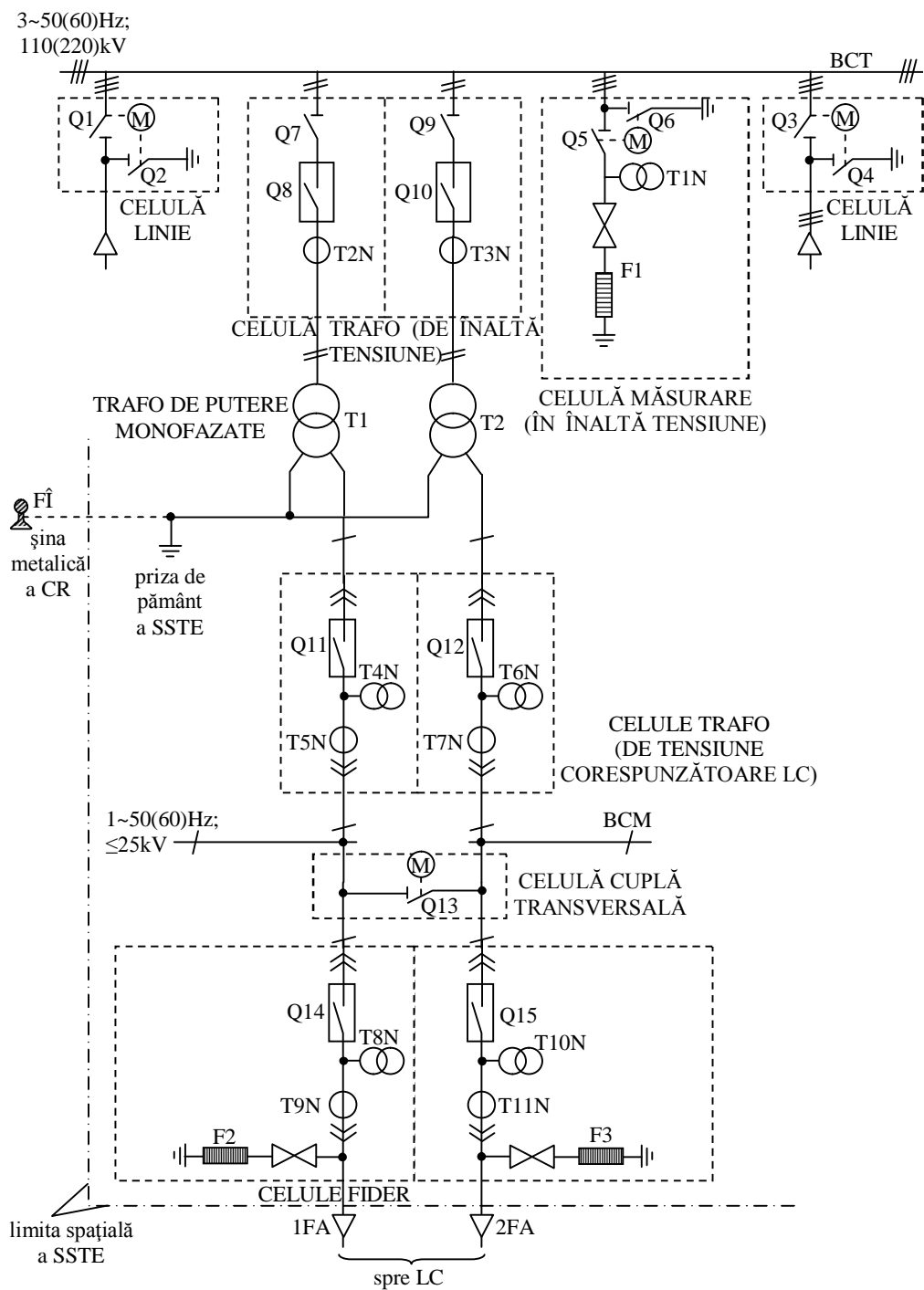


Fig. 3.7 SSTE de c.a. monofazat, de frecvență industrială, cu transformator de putere monofazat legat simplu. . Schema circuitelor primare

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- două transformatoare de putere monofazate, coborâtoare de tensiune, unul activ (T1), celălalt rezervă rece integrală (T2); câte unul din capetele înfășurării secundare al ambelor transformatoare se leagă împreună la priza de pământ a SSTE (pentru protecția împotriva tensiunilor de atingere și de pas periculoase) și, în același timp, la fiderii (FÎ) de întoarcere a curentului de la șina metalică a CR, pentru închiderea circuitului electric de tracțiune; transformatoarele de putere monofazate se construiesc și se exploatează, ținându-se seama de marea lor capacitate la suprasarcină, în special în condițiile tracțiunii electrice, unde curba de sarcină prezintă goluri alternate cu vârfuri de sarcină de scurtă durată; tensiunea transformatoarelor se reglează: (1) în trepte și sub sarcină, pe partea de înaltă tensiune, cu comutator acționat cu servomotor; (2) automat, pe partea tensiunii corespunzătoare LC, cu transformator survoltor și comutator sub sarcină;

- celule trafo (monofazate) debroșabile, de tensiune (până la 25 kV) corespunzătoare LC de c.a. monofazat, prevăzute cu întreruptor automat monopolar (Q11, respectiv Q12), în corpul căruia sunt înglobate transformatoare de măsură, de tensiune (T4N, respectiv T6N) și de curent (T5N, respectiv T7N);

- sistem monofazat (dublu) de bare colectoare (BCM) de tensiune (până la 25 kV) corespunzătoare LC, prevăzut cu celulă de cuplă transversală cu separator monopolar acționat cu servomotor (Q13);

- celule de plecare, debroșabile, pentru fiderii de alimentare (1FA, 2FA) al LC, având, în plus față de echipamentul celulelor trafo de tensiunea corespunzătoare LC, descărcătoare cu rezistență variabilă (F2, respectiv F3) (pentru protecția împotriva supratensiunilor interne sau provenind din LC).

Pentru compensarea puterii reactive (pe secvența directă a armonice fundamentale) la nivelul SSTE de c.a. monofazat se utilizează

baterii de condensatoare. În cazul compensării longitudinale, bateria de condensatoare se înseriază simplu pe legătura de șină a transformatorului de putere monofazat din SSTE, realizându-se, astfel, și o ameliorare a nivelului de tensiune în LC.

Schemele de SSTE de c.a. monofazat redată în fig. 2.4 ÷ 2.7 prezintă următoarele avantaje importante:

- sunt simple constructiv și comode în exploatare;
- costul lor este redus, iar întreținerea lor necesită cheltuieli mici;
- asigură tensiune ridicată în LC, ceea ce conduce la distanțe mari (40 ÷ 80 km) între SSTE adiacente, respectiv la un număr redus de SSTE ce trebuie instalate;
- permit funcționarea în paralel a transformatoarelor de putere din SSTE adiacente, prin intermediul LC și deci, alimentarea bilaterală a zonelor fider ale LC (cu consecința ameliorării nivelului de tensiune în LC și solicitării mai uniforme a instalațiilor fixe de tracțiune electrică);
- în plus, schemele de SSTE de c.a. monofazat de frecvență industrială (fig. 2.5 ÷ 2.7) se încadrează simplu în sistemul electroenergetic general.

### **3.2. FIDERI DE ALIMENTARE (FA) și de ÎNTOARCERE (FÎ). RETURUL CURENTULUI ELECTRIC DE TRACȚIUNE.**

Alimentarea electrică a LC de la SSTE se asigură prin *fiderii de alimentare* (FA) care sunt, uzual, LEA din oțel-aluminiu susținute pe stâlpi de beton sau metalici. În general, racordul FA la LC este dublu, prin separatoare de fider acționate manual sau cu servomotor.

Returul curentului electric de tracțiune la bara negativă a SSTE de c.c., respectiv la bornele secundare corespunzătoare ale transformatoarelor de putere din SSTE de c.a., se face prin șinele



metalice ale CR (sau printr-un al doilea fir de contact, în cazul LC bifilare de troleibuz) și de la acestea prin *fiderii de întoarcere (FÎ)*, realizați în cablu sau aerian.

La șinele metalice ale CR, conexiunea FÎ se efectuează în mod diferențiat, în funcție de soluția de echipare a CR cu circuite de cale (reprezentând circuite electrice de semnalizare și comandă, care utilizează drept conductoare porțiuni din șinele metalice ale CR):

- la CR neechipate cu circuite de cale, conexiunea FÎ se face direct la șine;
- la CR echipate cu circuite de cale monofilare, conexiunea se face direct la șina de tracțiune;
- la CR echipate cu circuite de cale bifilare, conexiunea la șine se face indirect, prin intermediul unor bobine de joantă.

La SSTE de c.c., FÎ se racordează la bara negativă (care nu este legată direct la pământ) a SSTE. La SSTE de c.a., FÎ se leagă împreună cu bornele secundare corespunzătoare ale transformatoarelor de putere din SSTE la priza de pământ a SSTE.

Deoarece șina metalică a CR nu este izolată față de sol, o parte (mai importantă, în principiu, la STE în c.a.) din curentul de tracțiune de retur este derivat din șină în sol sub forma unor linii de curenți vagabonzi (sau de dispersie). În cazul când acești curenți sunt alternativi, ei pot determina (dacă nu se iau măsuri protective corespunzătoare) t.e.m. induse perturbatoare în circuitele electrice de joasă tensiune din vecinătatea CR.

În cazul STE în c.c., câmpul de curenți vagabonzi este la originea coroziunii electrolitice a anumitor zone ale instalațiilor metalice îngropate (conducte, cabluri telefonice, etc.). Mai exact, zonele unde curenții vagabonzi „intră” din sol în instalațiile metalice îngropate (zone catodice) nu prezintă pericol de coroziune, în vreme ce zonale unde

instalațiile metalice subterane „cedează” curent în sol (zone anodice) sunt sediul fenomenului de electrocoroziune (adică, migrarea progresivă în soluția electrolitică din sol a cationilor din rețeaua cristalină a metalului instalației îngropate) (fig. 3.8). Zonele catodice sunt situate în lungul CR, între punctele de alimentare a LC de la SSTE de c.c. și depind de poziția VEM neautonom pe CR (fig. 3.8). Zonele anodice sunt localizate în vecinătatea SSTE de c.c., întrucât bara negativă a acesteia este legată prin FÎ la șina metalică a CR (fig. 3.8).

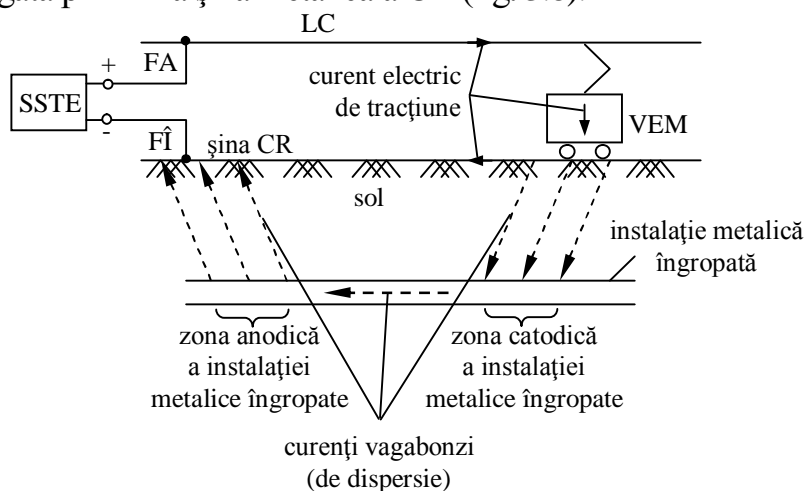


Fig.3.8. Curenți vagabonzi și fenomenul de electrocoroziune al instalațiilor metalice subterane.

România se numără printre primele țări europene care au trecut la reglementări privitoare la reducerea curenților vagabonzi din sol și la protecția anticorrosivă a construcțiilor metalice îngropate. Metodele de protecție împotriva electrocoroziunii prin curenți vagabonzi se pot clasifica în:

- *metode pasive*, care asigură fie concentrarea unei fracțiuni cât mai mari a curentului de tracțiune de retur în șinele metalice ale CR (prin sudarea sau eclisarea electrică a joantelor și prin creșterea (limitată) a rezistenței electrice șină-sol la construcția infrastructurii CR), fie evitarea pătrunderii curenților vagabonzi în instalațiile metalice subterane (prin

izolarea acestora cu ajutorul învelișurilor protectoare și al joncțiunilor izolante);

- *metode active*, care urmăresc redistribuirea judicioasă a câmpului de curenți vagabonzi cu scopul imprimării unui potențial catodic protectiv pe zone cât mai extinse ale instalațiilor metalice îngropate. Cea mai utilizată dintre aceste metode este cea a drenajului electric, constând în efectuarea unei legături conductoare între instalația metalică subterană și punctul de racord al FÎ la șina CR. În acest mod, curenții vagabonzi nu mai sunt "cedați" în zona anodică pe cale electrolitică decât într-o mică măsură, cea mai mare parte a acestor curenți fiind "drenată" pe cale electrică prin legătura conductoare dintre instalația metalică îngropată și șina CR. Înseriind pe legătura de drenaj o celulă redresoare, rezultă un drenaj electric polarizat, prin care se evită pericolul de electrocoroziune în cazul inversării sensului curenților vagabonzi. Schema de principiu a unui post de drenaj electric polarizat, este prezentată în fig. 3.9. Diodele de siliciu D1 și germaniu D2 conectate în derivație, împreună cu rezistorul R2 de limitare a curentului direct maxim prin D2 și șuntul RN de măsurare a curentului din legătura de drenaj, se instalează într-o cutie metalică.

Pentru limitarea supratensiunilor accidentale pe CR, se înseriază un dispozitiv de protecție între șina CR și postul de drenaj electric polarizat, constituit dintr-un fuzibil F1 și un eclator cu vârfuri F2 (în cazul unei supratensiuni ridicate, acționează eclatorul antrenând arderea fuzibilului și ca urmare, izolarea postului de drenaj de șinele CR). De asemenea, pentru limitarea curentului de drenaj la o valoare convenabilă, pe conexiunea dintre instalația metalică îngropată și postul de drenaj se înseriază rezistorul R1. În sfârșit în cazul în care STE în c.c. este prevăzut cu circuit de cale, pentru ca legătura de drenaj să nu constituie o punere la pământ pentru acest circuit, se înseriază o bobină de reactanță

L pe legătura dintre postul de drenaj și șina CR.

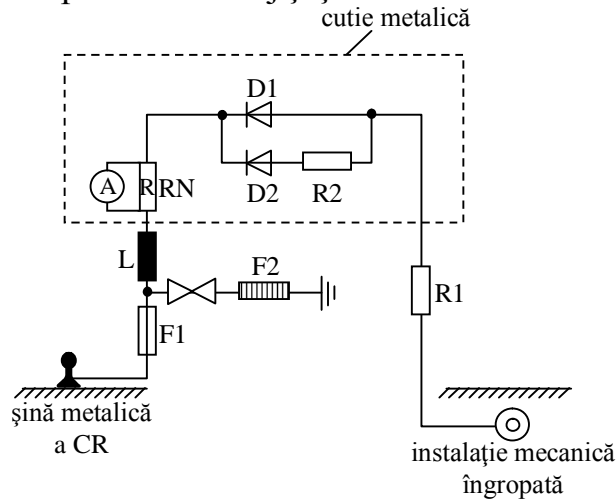


Fig. 3.9. Post de drenaj electric polarizat. Schema de principiu

Protecția anticorozivă prin drenaj electric polarizat se aplică eficient și acolo unde este necesar un drenaj colectiv pentru protecția simultană a instalațiilor metalice îngropate, constituite din metale diferite și situate într-un perimetru cu mare densitate de astfel de instalații.

## 3.3. LINIA DE CONTACT (LC)

Linia de contact (LC) constituie partea instalațiilor fixe de tracțiune electrică, prin care se asigură transportul, aerian sau la sol, al energiei electrice în lungul căii de circulație și de la care VEM neautonome se alimentează printr-un contact electric alunecător (numit culegător sau captator de curent). În fapt, LC realizează conexiunea electrică între SSTE și VEM neautonome.

Principalele părți componente ale LC sunt: *suspensia (respectiv, șina) de contact și instalațiile de susținere ale suspensiei (respectiv, șinei) de contact.*

LC pune două categorii de probleme:

- *mechanice*, legate de evitarea desprinderii captatorului de curent al VEM de pe firul (mai rar, șina) de contact și menținerea constantă a presiunii de contact în orice regim de funcționare al VEM;

- *electromagnetice*, legate de influențele electrostatice, inductive și galvanice ale LC (respectiv, ale circuitului electric de tracțiune) asupra rețelelor electrice de joasă tensiune din vecinătate.

### 3.3.1. Suspensia de contact și instalațiile ei de susținere

*Firul de contact* are în secțiune aria nominală de  $50 \div 600 \text{ mm}^2$  și o formă adaptată la fixarea ușoară în cleme (fig. 3.10). El se execută din cupru electrolitic (tras la rece din bare), oțel-cupru, oțel-aluminiu, cadmiu-cupru etc.

Pentru ca uzura captatorului de curent al VEM să fie uniformă, dispunerea în plan orizontal, deasupra căii de circulație, a firului de contact se face, de obicei, în zigzag și nu în axa (sau aliniamentul) căii.

În cazul LC de c.c. cu două fire de contact, eventualele macaze (sau ramificații) sunt aeriene și pot fi comandate din VEM (troleibuz) de către conducătorul acestuia. Schema electrică de principiu a unui astfel de macaz aerian este prezentată în fig. 3.11.

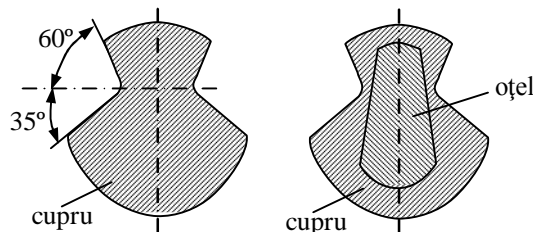
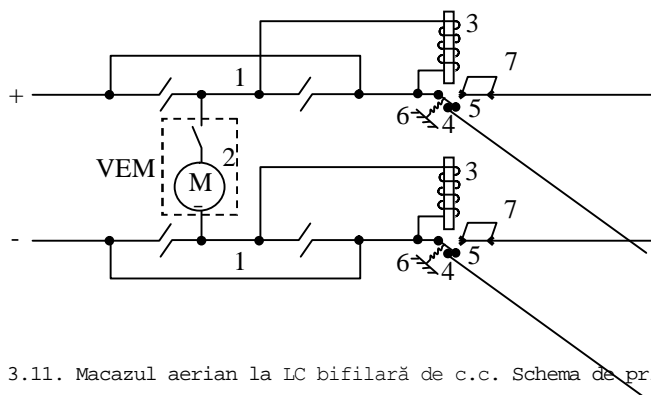


Fig. 3.10. Tipuri uzuale de fire de contact. Secțiune

# TRACTIUNE ELECTRICĂ



Astfel, pentru mersul înainte al VEM este necesar ca la trecerea pe sub firele de contact izolate 1, motorul electric de tracțiune 2 să fie conectat (permițând alimentarea bobinei electromagnetului 3 și ca urmare, atragerea acului de macaz 4 într-o poziție în care rămâne blocat prin mecanismul 5), iar pentru devierea spre dreapta a VEM, aceeași trecere să se efectueze cu motorul 2 decuplat (când acul de macaz 4 este menținut în poziția din fig. 3.11, prin acțiunea resortului 6). Pe firele de contact corespunzătoare mersului înainte al VEM este plasat mecanismul 7 pentru deblocarea acului de macaz 4 și revenirea acestuia în poziția inițială (cea din fig. 3.11), sub acțiunea resortului 6.

Pentru realizarea unui captaj cât mai bun al curentului electric de la LC aeriene, fără desprinderea patinei culegătorului de curent al VEM de pe firul de contact, îndeosebi la viteze mari de circulație, se impun următoarele condiții mecanice:

- păstrarea paralelismului dintre LC și calea de circulație, în plan vertical;
- elasticitate mecanică redusă și cât mai uniformă pe întreaga deschidere a LC. Aceste condiții sunt satisfăcute dacă valoarea efortului de întindere a firului de contact este mare, dacă distanța între punctele de susținere a LC este mică, dacă masa firului de contact este redusă etc.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Ansamblul format din firul de contact și sârmele sau funiile metalice necesare pentru susținerea acestuia la o înălțime constantă deasupra căii de circulație constituie suspensia de contact. La LC de tracțiune electrică urbană este uzuală suspensia transversală (fig. 3.12), cu deschideri mici, compusă din firele de contact 1 prinse de sârmele din oțel zincat 2, ce traversează, pe deasupra, calea de circulație și se ancorează prin izolatori de suptorii 3. La LC de tracțiune electrică feroviară se utilizează suspensia longitudinală sau catenară (fig. 3.13), compusă din firul de contact, fc, susținut de un cablu purtător, cp, (multifilar, din bimetel sau oțel zincat) prin intermediul unor pendule articulate, pa, (din conductor monofilar de oțel-cupru sau sârmă zincată).

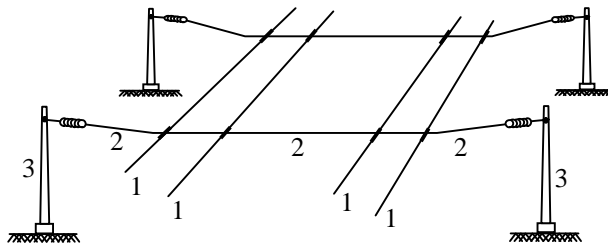


Fig. 3.12. Suspensie transversală.

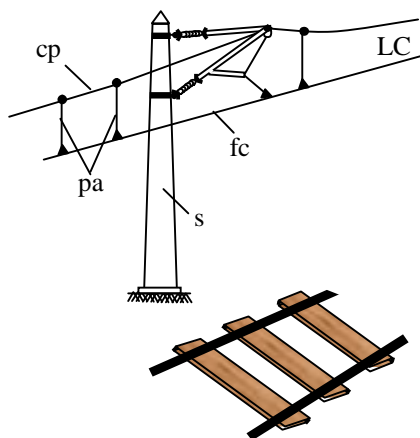


Fig. 3.13. Suspensie catenară.

Suspensiile catenare pot fi: simple (fig. 3.13 și 3.14, a), dacă pendulele, *pa*, sunt articulate rigid, în Y (fig. 3.14, b), dacă în dreptul suporturilor (stâlpilor), *s*, există pendule elastice, *pe*, (pentru uniformizarea elasticității suspensiei) și compuse (fig. 3.14, c), dacă firul de contact, *fc*, este suspendat prin pendule rigide, *pa*, de un cablu purtător intermediar, *ci*, care la rândul său este legat tot prin pendule articulate, *pa*, de cablul purtător principal, *cp*. Aceste din urmă suspensii catenare sunt frecvente la STE în c.c., la care trebuie susținute fire de contact grele, cu secțiune mare ( $300 \div 600 \text{ mm}^2$ ).

În funcție de poziția firului de contact în raport cu cablul purtător, suspensiile catenare se clasifică în: verticale (fig. 3.14, d), caracterizate prin menținerea cablului purtător, *cp* și a firului de contact, *fc*, în același plan vertical (pendulele care le leagă fiind verticale), oblice (fig. 3.14. e), la care cablul purtător, *cp*, este menținut în axa căii (pendulele fiind oblice) și ondulate (fig. 3.14, f), caracterizate prin opoziția de fază între proiecțiile traseelor cablului purtător, *cp*, respectiv firului de contact, *fc*, în plan orizontal (pendulele fiind secante la axa căii).

Pentru menținerea efortului de întindere a firului de contact și a cablului purtător, în vederea asigurării paralelismului dintre LC și calea de circulație (respectiv, a săgeții firului de contact în limitele admisibile), se impune segmentarea mecanică longitudinală a suspensiei catenare în tronsoane de  $150 \div 2000 \text{ m}$ , numite zone, (sau sectoare) de ancorare. Capetele conductoarelor longitudinale ale suspensiei catenare, care delimitează o zonă de ancorare, se leagă la instalațiile de susținere a suspensiei de contact, uzual, prin intermediul unor dispozitive de întindere, numite compensatoare. Astfel, suspensiile catenare se împart în: semicompensate și complet compensate, după cum ancorarea compensată se aplică numai firului de contact, respectiv atât firului de contact, cât și cablului purtător.



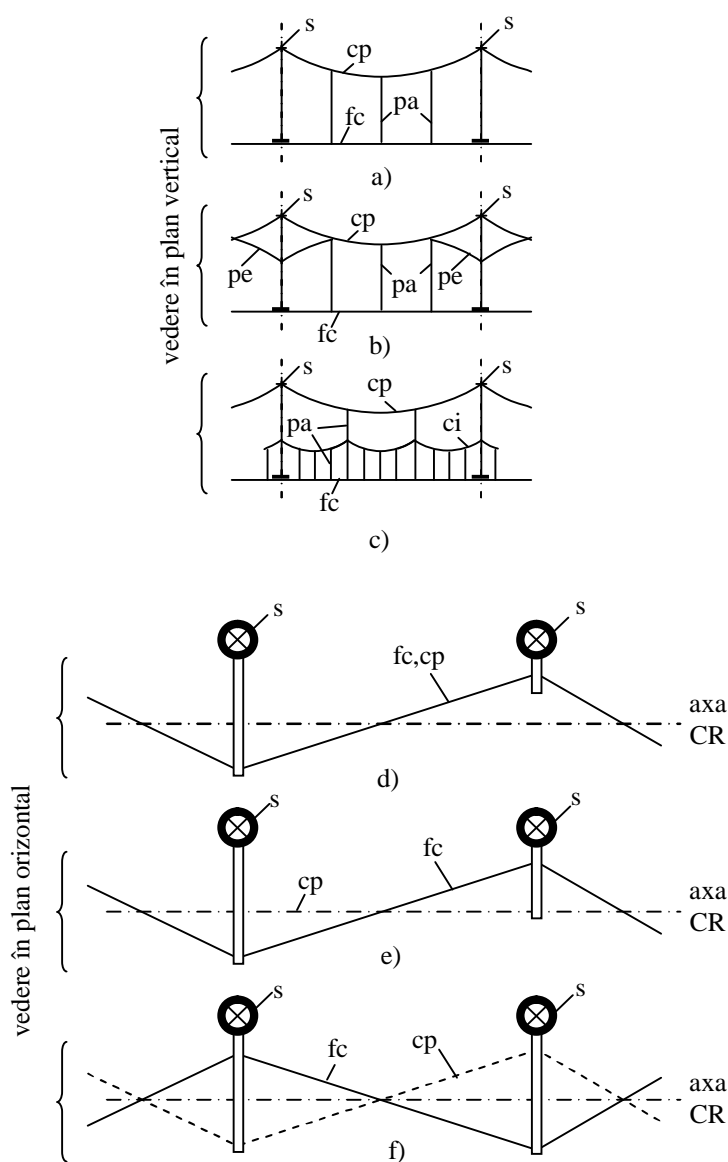


Fig. 3.14. Tipuri de suspensii catenare.

La joncțiunea dintre două zone de ancorare adiacente din lungul caii de circulație trebuie asigurată trecerea captatorului de curent al VEM neautonom de pe firul de contact al unei zone de ancorare pe cel al zonei următoare, fără micșorarea vitezei VEM și fără slăbirea prizei de curent.

În fig. 3.15 se prezintă vederea în plan orizontal a unei joncțiuni neizolate între două zone de ancorare învecinate. Această joncțiune asigură continuitatea mecanică și electrică a LC la limita celor două zone de ancorare. Ea se realizează, uzual, cu trei deschideri, cea mediană fiind de trecere. Prin introducerea unor lanțuri de izolatoare în suspensiile catenare din joncțiune, aceasta devine izolată (sau cu secționare, realizându-se pe lângă separarea mecanică a celor două zone de ancorare învecinate și izolarea lor electrică. De asemenea, la joncțiunea sectoarelor de ancorare se pot intercala și *zone neutre*, adică porțiuni izolate în LC, care fie că în mod normal nu se află sub tensiune, fie că se pot scoate ușor de sub tensiune. Deși trecerea VEM neautonome pe sub zona neutră din LC se face prin inerție (motoarele de tracțiune ale VEM fiind deconectate), totuși zona neutră trebuie echipată cu separatoare, pentru a putea fi pusă sub tensiune, cel puțin în cazul de forță majoră, când un VEM s-a oprit chiar în zona neutră și trebuie scos de acolo.

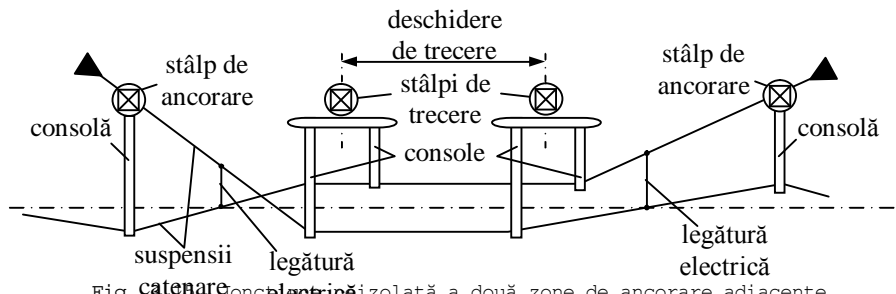


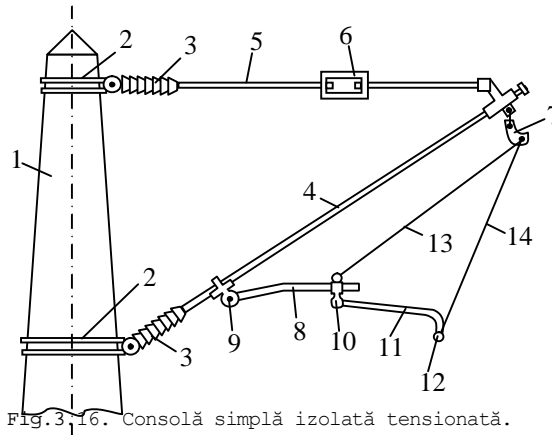
Fig. 3.15. Joncțiune neizolată a două zone de ancorare adiacente  
(situată în aliniamentul căii).

Principalii factori care determină alegerea corectă a tipului de suspensie catenară sunt: viteza de circulație a VEM neautonome, considerentele de ordin tehnico-economic și factorii meteorologici. Astfel, de exemplu, la viteze de circulație de până la 100 km/h se pot utiliza suspensii catenare simple, semicompensate, peste 100 km/h sunt necesare suspensii catenare simple sau în Y, complet compensate, iar pentru viteze foarte mari, de 200 ÷ 300 km/h, trebuie folosite suspensii

catenare compuse, rigide sau elastice și stâlpii de sprijin.

*Instalațiile de susținere a suspensiei de contact* au rolul de a asigura poziția corespunzătoare a acestora în raport cu calea de circulație. Cele mai importante elemente ale instalațiilor de susținere ale suspensiei de contact sunt: consolele, traversele

*Consolele* reprezintă suporturi cu tiranți utilizate la susținerea și fixarea cablurilor purtătoare și a firelor de contact. Poziția în spațiu a consolelor se reglează într-un plan ortogonal la calea de circulație. În funcție de numărul de LC pe care le acoperă și le deservește, consolele pot fi simple sau duble. La rândul lor, consolele simple pot fi realizate cu tirant comprimat (dacă sunt montate pe suporturi plantați pe partea interioară a curbilor căii de circulație) sau cu tirant tensionat (dacă sunt fixate pe suporturi amplasați în aliniament sau pe partea exterioară a curbilor căii de circulație). În fig. 3.16 sunt evidențiate părțile constructive de bază ale unei console simple izolate tensionate. Astfel, consola este fixată pe suportul de sprijin (stâlpul) 1 prin intermediul crapodinelor colier 2. De acestea sunt prinse izolatoarele baston 3, care separă contrafișa din țeava 4 și tirantul tensionat 5 (cu întinzătorul 6) de suportul 1. În nodul articulației dintre contrafișă și tirant se montează șaua 7 de susținere a cablului purtător. De contrafișă este prins port-fixatorul 8, prin intermediul mufei terminale 9. Celălalt capăt al port-fixatorului se trece prin mufa cu pinten și ochi 10, de care se prinde fixatorul din țeava 11. Rolul fixatorului este de a crea zigzagurile firului de contact în dreptul suporturilor (stâlpilor), precum și de a limita devierile firului datorită vântului. În capul fixatorului 12 se montează clema de fixare a firului de contact. De ochiul șei 7 se prinde sârma de fixare 13, având celălalt capăt legat de ochiul mufei cu pinten 10. În sfârșit, în nodul de susținere de la stâlp se poate, eventual, articula pendula 14, ce leagă cablul purtător de firul de contact.



*Traversele rigide* constituie grinzi metalice cu rol de susținere al suspensiilor catenare pentru un număr de  $8 \div 10$  LC. Dacă este necesar, pe stâlpii care susțin rigla metalică a traversei rigide se montează și console, numărul LC acoperite crescând astfel cu încă una sau două.

*Traversele elastice* reprezintă ansambluri de cabluri (purătoare și de fixare) suspendate pe stâlpi metalici, transversal față de LC și calea de circulație, servind la susținerea unui număr mare de suspensii catenare (de exemplu, în stații și triaje feroviare).

*Stâlpii de sprijin ai suspensiei de contact* se confecționează din beton armat (precomprimat) sau din profile de oțel și, în funcție de poziția ocupată și de rolul îndeplinit în cuprinsul zonei de ancorare, se clasifică în;

- stâlpi de ancorare, amplasați la capetele zonei de ancorare și solicitați la eforturi orientate atât în lungul, cât și perpendicular pe calea de circulație;

- stâlpi de trecere, care, ca poziție, preced stâlpii de ancorare în joncțiunile zonelor de ancorare, iar, după natura solicitării lor, se aseamănă cu stâlpii intermediari;

- stâlpi intermediari (cei mai numeroși), amplasați în cadrul zonei de ancorare și solicitați la eforturi pe direcție perpendiculară pe axa căii.

Pentru asigurarea securității personalului de exploatare și pentru sporirea siguranței protecției LC contra curenților de scurtcircuit, toți stâlpii de sprijin ai suspensiei de contact se leagă la șina metalică a CR prin intermediul unui conductor special de oțel. De asemenea, pentru protecția împotriva supratensiunilor atmosferice, pe stâlpii LC se montează descărcătoare tubulare.

Captarea energiei electrice, de la LC aeriene prin procedeele convenționale descrise mai sus devine practic inutilizabilă la valori ale vitezei de circulație a VEM de peste 300 km/h datorită:

- dificultății de menținere a unui contact permanent între culegătorul de curent al VEM și LC;
- uzurii mecanice și electrice intense atât a culegătorului de curent, cât și a firului de contact.

În acest context, s-a conturat ideea folosirii captării neconvenționale (fără contact mecanic) a energiei electrice, de la LC uzuale prin arc electric controlat în jet axial de plasmă. Comparativ cu alte metode neconvenționale de transfer al energiei electrice pe VEM (de exemplu, prin ghiduri de unde electromagnetice), metoda cu arc electric controlat prezintă următoarele avantaje:

- asigură un randament energetic ridicat al transferului unor puteri mari necesare în tracțiunea electrică de mare viteză;
- necesită amenajări minime ale LC existente;
- captatorul de curent este ușor și de dimensiuni reduse, în condițiile în care arcul electric este controlat relativ departe de ajutorul de ieșire a gazului inert de lucru (argon, azot sau amestecuri ale acestora), încât până la distanțe LC - captator de 6÷10 mm nu este necesară o ecranare aerodinamică suplimentară după direcția de deplasare a VEM, chiar pentru curenți de 350 A;
- captatorul (electrodul colector) este practic neconsumabil și nu

trebuie protejat termic suplimentar;

- consumul gazului inert de lucru se păstrează la un nivel acceptabil, chiar la viteze de circulație ale VEM foarte mari.

Ca dezavantaj trebuie menționată eficiența totuși scăzută a controlului arcului electric după direcția axială, ceea ce face necesară optimizarea funcționării unor arcuri electrice de lungimi mari, la viteze ridicate ale VEM.

### **3.3.2. Șina de contact și instalația de susținere**

Furnizarea energiei de c.c. ramelor electrice de metrou, respectiv energiei de c.a. trifazat vehiculelor pe pernă de aer sau magnetică, se realizează, uzual, la sol printr-o șină de contact, plasată lateral față de VEM și alimentată, la rândul ei, prin FA de la SSTE.

În fig. 3.17,a se prezintă schematic construcția șinei de contact și a instalației de susținere aferente pentru alimentarea în c.c. (de 750 V) a ramelor electrice de metrou. Astfel, șina de contact 1 (numită șina a treia) este dispusă lateral față de CR și este susținută (la cca. 20 cm înălțime față de CR) prin suportul 2, prins, la rândul său, de traversa 3 a CR cu șine 4. Izolatoarele 5 separă electric șina de contact de suportul ei și de celelalte două șine ale CR ghidate.

VEM pe pernă de aer sau magnetică pot dezvolta viteze de  $300 \div 500$  km/h și sunt echipate, uzual, cu convertoare statice de putere permițând circulația bidirecțională a fluxului energetic, în aceste condiții, se impun alimentarea în c.a. trifazat a VEM, prin contacte alunecătoare, la tensiuni de linie de până la 8 kV și evitarea întreruperii transferului de energie pe VEM chiar pentru durate scurte. Studii aprofundate teoretice și experimentale au condus la concluzia că pentru îndeplinirea acestor cerințe severe LC trebuie să fie cvasirigidă, de tip șină de contact.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

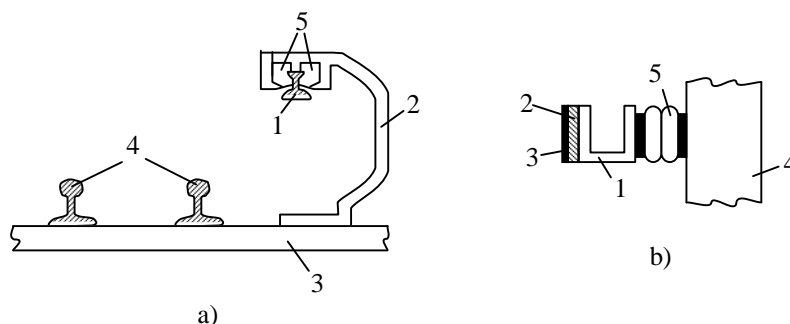


Fig. 3.17. Șina de contact și instalația ei de susținere la LC metropolitană (a), respectiv la LC pentru VEM pe pernă de aer sau magnetică (b).

Ea este prevăzută pe fiecare fază (fig. 3.17, b) cu o parte din profil de oțel 1 pentru rigiditate mecanică, o placă de aluminiu sau cupru 2 pentru preluarea curentului electric cu pierderi reduse și o peliculă de contact termorezistentă 3, toate susținute pe suportul 4, de care sunt separate electric prin izolatorul 5. Având în vedere reducerea influenței, condițiilor climatice asupra contactului electric, se recomandă așezarea în plan vertical a celor trei conductoare de fază ale șinei de contact. Este necesar, de asemenea, un al patrulea conductor - de nul - pentru punerea la pământ a VEM, protejându-se astfel pasagerii față de căderile la masă ale părții electrice și față de supratensiunile atmosferice.

De VEM sunt fixate, prin intermediul izolatoarelor, cele patru captatoare de fază, prevăzute cu perii (din materiale pe bază de grafit, aliaje metalice auto-lubrifiante și aliaje rezistente la uzură), la care forța de apăsare, reglabilă funcție de intensitatea curentului electric captat, rămâne constantă pe o distanță superioară abaterilor constructive ale șinei de contact și mișcărilor parazite ale VEM.

În cazul VEM pe pernă da aer sau magnetică suspendate, șina de contact trifazată este dispusă pe stâlpii-suport ai căii de circulație, iar între acești stâlpi este fixată prin suporturi intermediare ce se sprijină pe grinzile de susținere ale căii.

### 3.3.3. Influențele electromagnetice ale LC (respectiv, ale circuitului electric de tracțiune) asupra rețelelor electrice de joasă tensiune din vecinătate

LC (respectiv, circuitul electric de tracțiune) poate exercita asupra rețelelor electrice de joasă tensiune din vecinătate influențe electrostatice (sau capacitive), inductive și galvanice (sau conductive).

Influența electrostatică. Se consideră firul de contact de rază  $r_{fc}$  al unei LC (de c.c. sau c.a.) aflat la înălțimea  $b$  deasupra pământului și având tensiunea  $U_{LC}$  față de pământ (considerat la potențial electric nul,  $V = 0$ ) (fig. 3.18). În câmpul său electrostatic, la distanța pe orizontală  $d$  de el, se găsește firul conductor al unei linii electrice (LE) de joasă tensiune (de exemplu, o linie de telecomunicații), izolat față de pământ și având, la rândul său, înălțimea  $c$  în raport cu solul. Prin fenomenul de inducție electrostatică, pe suprafața firului conductor, izolat față de pământ, al LE da joasă tensiune se separă sarcini electrice egale și de semn contrar. Tensiunea  $U_{LE}$  față de pământ a acestui fir conductor, indusă electrostatic de LC, se poate determina din relațiile lui Maxwell pentru sisteme de conductoare în echilibru electrostatic:

$$\begin{aligned} U_{LC} &= p_{LC} q_{LC} + p_{LC,LE} + q_{LE} \\ U_{LE} &= p_{LE,LC} q_{LC} + p_{LE} + q_{LE} \end{aligned} \quad (3.1)$$

și, întrucât  $q_{LE} = 0$ , conform definiției inducției electrostatice, rezultă:

$$U_{LE} = U_{LC} p_{LE,LC} / p_{LC} \quad (3.2)$$

Coeficienții de potențial  $p_{LC}$  și  $p_{LE,LC}$  se calculează simplu prin metoda imaginilor electrice (fig. 3.18):

$$p_{LC} = (1/2 \pi \epsilon l) \ln(d_1 / r_{fc}) = (1/2 \pi \epsilon l) \ln(b / r_{fc}) \quad (3.3)$$

$$p_{LE,LC} = (1/2 \pi \epsilon l) \ln(d_3 / d_2) = \frac{1}{4 \pi \epsilon l} \ln \frac{d^2 + (b+c)^2}{d^2 + (b-c)^2}, \quad (3.4)$$



unde  $l$  reprezintă lungimea de paralelism între LC și LE de joasă tensiune, iar  $\varepsilon$ , permitivitatea mediului dintre ele.

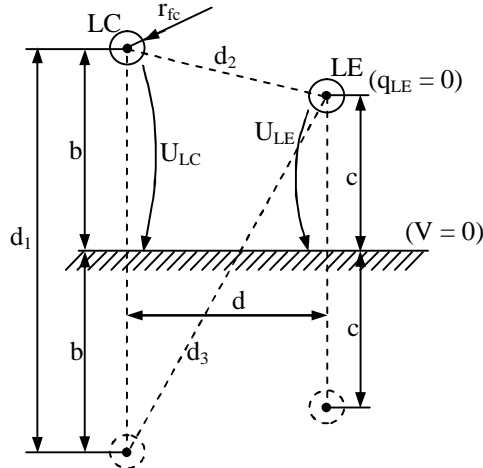


Fig. 3.18. Influența electrostatică a LC asupra unei LE de joasă tensiune.

Relațiile anterioare (3.2) ÷ (3.4) conduc la următoarea expresie de calcul a tensiunii induse electrostatic  $U_{LE}$ :

$$U_{LE} = U_{LC} \ln \frac{d^2 + (b+c)^2}{d^2 + (b-c)^2} \bigg/ 2 \ln \frac{2b}{r_{fc}}. \quad (3.5)$$

**Exemplul 3.1.** Pentru valorile numerice (uzuale în tracțiunea electrică feroviară în c.a. monofazat):  $b = 6,5$  m,  $c = 6$  m,  $r_{fc} = 6$  mm,  $U_{LC} = 25$  kV și  $d = 10$  m, rezultă  $U_{LE} = 1,56$  kV, adică o tensiune electrică suficient de mare pentru a provoca intrarea în funcțiune a aparatelor de protecție de pe LE de joasă tensiune.

În cazul LC cu suspensie catenară, se procedează la echivalarea ansamblului de conductoare format din cablul purtător, cp, (situat la înălțimea  $g$  față de sol), pendulele articulate, pa și firul de contact,  $fc$ , aflate la aceeași tensiune  $U_{LC}$ , cu un singur fir conductor (fig. 3.19), având raza, respectiv înălțimea deasupra solului:

$$r_e = \sqrt{r_{fc}(g-b)}, \quad e = \sqrt{bg}. \quad (3.6)$$

Cu substituțiile  $r_e \rightarrow r_{fc}$ ,  $e \rightarrow b$  în relația (3.5), se poate determina tensiunea indusă electrostatic  $U_{LE}$  în acest caz.

Dacă în apropierea unei LE de joasă tensiune se află nu una, ci mai multe LC paralele, evident, influența electrostatică exercitată asupra LE crește.

Curentul electric de scurgere prin corpul omului care atinge un element al LE (de joasă tensiune) supuse influenței electrostatice exercitate de LC, este proporțional cu tensiunea LC, cu lungimea de paralelism  $l$  și cu capacitatea electrică parțială dintre LE și LC.

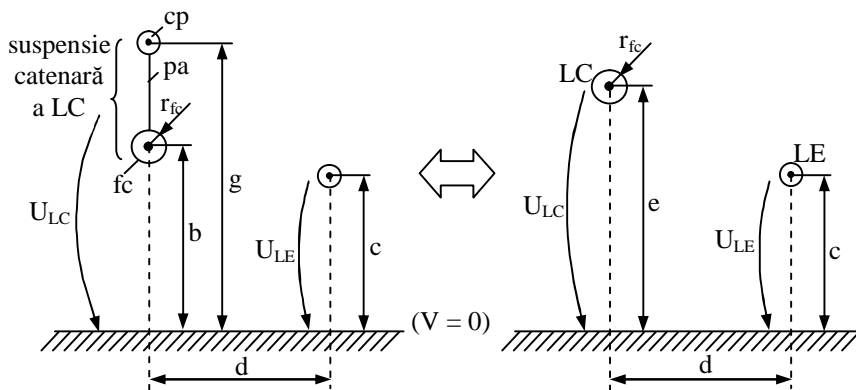


Fig. 3.19. Echivalarea cu un singur fir conductor a suspensiei catenare pentru determinarea influenței electrostatice a LC asupra LE de joasă tensiune din vecinătate

**Exemplul 3.2.** Pentru valorile numerice  $b = c = 6\text{m}$ ,  $l = 1,5\text{km}$ ,  $U_{LC} = 25\text{ kV}$  și  $d = 10\text{ m}$ , se obține un curent electric de scurgere (prin corpul omului, oare atinge un element al LE de joasa tensiune, aflată sub influența electrostatică a LC) de valoare 4,5 mA, inferioară limitei de pericolozitate, considerată la 15 mA.

Pentru reducerea influenței electrostatice a LC (de c.c. sau c.a.) asupra LE de joasă tensiune din vecinătate, izolate față de pământ, se impun următoarele măsuri practice:

- introducerea LE în cablu ecranat;

- mărirea distanței  $d$  dintre LC și LE;
- micșorarea înălțimii față de sol  $c$  a LE;
- plasarea unui conductor de protecție legat la pământ în apropierea LE sau între LC și LE.

Influența inductivă. Se realizează datorită cuplajului magnetic între circuitul electric de tracțiune - parcurs de c.a. și, eventual, de armonicele sale superioare, în cazul STE în c.a., respectiv parcurs de armonicele curentului redresat, în cazul STE în c.c. - și circuitele electrice de joasă tensiune din vecinătate, având un punct de legare la pământ. Câmpul magnetic variabil în timp, creat de c.a. de tracțiune induce în circuitele electrice de joasă tensiune (cu punct de legare la pământ) din vecinătate t.e.m. longitudinală de valoare efectivă:

$$E = \omega M I k \quad /V/, \quad (3.7)$$

unde  $\omega$ ,  $I$  reprezintă pulsația, respectiv valoarea efectivă a c.a. din circuitul de tracțiune;  $M$  este inductanța mutuală lineică între circuitul de tracțiune și cel de joasă tensiune din vecinătate (ambele circuite având retur de curent prin sol) și depinde de distanța dintre cele două circuite, de pulsația  $\omega$  și de conductivitatea electrică a solului;  $l$  semnifică lungimea de paralelism (mai exact, de vecinătate favorizând cuplajul inductiv) între cele două circuite;  $k$  reprezintă coeficientul (subunitar) reductor al t.e.m. induse, definit prin produsul  $k = k_s k_c k_e$ , cu  $k_s$ , coeficientul (subunitar) compensator datorat curenților induși în instalațiile metalice (la sol sau îngropate) din vecinătate ( $k_s$  poate lua valori între 0,2 și 0,9 în funcție de distanța dintre cele două circuite electrice, cu retur prin sol, aflate în cuplaj magnetic, de natura șinelor metalice ale CR și a joantelor lor, de numărul șinelor, de valoarea curentului de retur prin ele, de conductivitatea electrică a solului, de depărtarea de la SSTE etc),  $k_c$ , coeficientul (subunitar) compensator datorat curenților induși în mantaua și armătura LE în cablu

( $k_c$  are valoarea de calcul aproximativă 0,5),  $k_e$ , factorul (subunitar) de ecranare datorită eventualei prezențe în câmpul magnetic al c.a. de tracțiune a unor corpuri aflate la potențialul pământului.

Un alt caz de influență inductivă a circuitului de tracțiune asupra celor de joasă tensiune din vecinătate îl reprezintă cuplajul magnetic dintre șina de contact a STE de metrou, parcursă de armonicile superioare de curent redresat (introduse atât de redresoarele de putere din SSTE de c.c., cât și de convertoarele statice de putere din echipamentul de forță al ramelor electrice de metrou) și șinele metalice ale CR, care constituie, totodată, conductoarele circuitelor de cale.

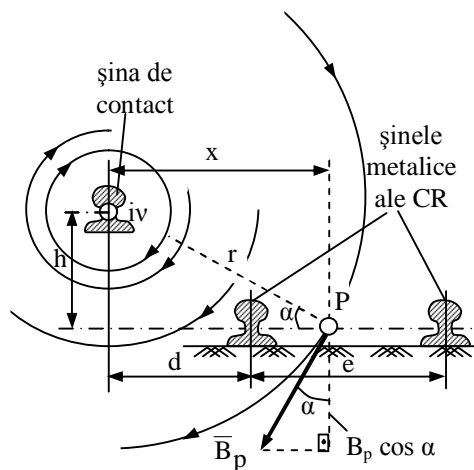


Fig. 3.20. Influența inductivă a șinei de contact a STE de metrou asupra circuitelor de cale (cu conductoare constituite din șinele metalice ale CR).

Cu referire la geometria din fig. 3.20, liniile de inducție ale câmpului magnetic plan-parallel creat de armonica de curent  $i_v$  din șina de contact pot fi considerate cercuri concenrice în jurul șinei de contact. Pe un astfel de cerc de rază  $r$ , într-un punct  $P$  situat între șinele CR, la distanța  $x$  pe orizontală de șina de contact, inducția magnetică are expresia cunoscută  $B_p = \mu_0 i_v / 2\pi r$ , cu  $\mu_0$  reprezentând permeabilitatea

magnetică a mediului dintre șine, admisă egală cu cea a vidului. Componenta normală a inducției magnetice la planul circuitului de cale, constituit din șinele metalice ale CR, se scrie  $B_p \cos \alpha = \mu_0 i_v x / 2\pi r^2$ . Corespunzător, fluxul magnetic total de înălțuire al circuitului de cale, pe lungimea  $l$ , rezultă:

$$\begin{aligned} \psi &= \int_d^{d+e} B_p \cos \alpha dx = \frac{\mu_0 i_v l}{2\pi} \int_d^{d+e} \frac{x dx}{h^2 + x^2} = \\ &= \frac{\mu_0 i_v l}{4\pi} \ln \frac{h^2 + (d+e)^2}{h^2 + d^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

iar t.e.m. indusă de acest flux magnetic în circuitul de cale obține valoarea efectivă:

$$E_v = (1/2) \mu_0 f_v I_v \ln \frac{h^2 + (d+e)^2}{h^2 + d^2}, \quad (3.9)$$

unde  $f_v$ ,  $I_v$  reprezintă frecvența, respectiv valoarea efectivă, a armonice de curent  $i_v$  considerate în șina de contact.

**Exemplul 3.3.** Pentru valorile numerice uzuale  $h = d = 0,3$  m,  $e = 1,435$  m și inductanța lineică a circuitului de cale de  $1,3$   $\mu\text{H/m}$ , raportul dintre armonicile de același ordin ale curentului de perturbație din circuitul de cale și curentului de tracțiune din șina de contact rezultă de aproximativ 22%.

Principalele măsuri de protecție a circuitelor de joasă tensiune contra influenței inductive a circuitului de tracțiune sunt:

- mărirea distanței dintre circuitul electric de tracțiune și cel de joasă tensiune din vecinătate;
- ecranarea în cablu a LE de joasă tensiune;
- legarea la șina metalică a CR a LE de joasă tensiune și a echipamentelor aferente amplasate la distanțe sub 5 m de axa CR, respectiv legarea la prize de pământ a celor mai depărtate;
- montarea în circuitele de joasă tensiune a unor transformatoare

de separare.

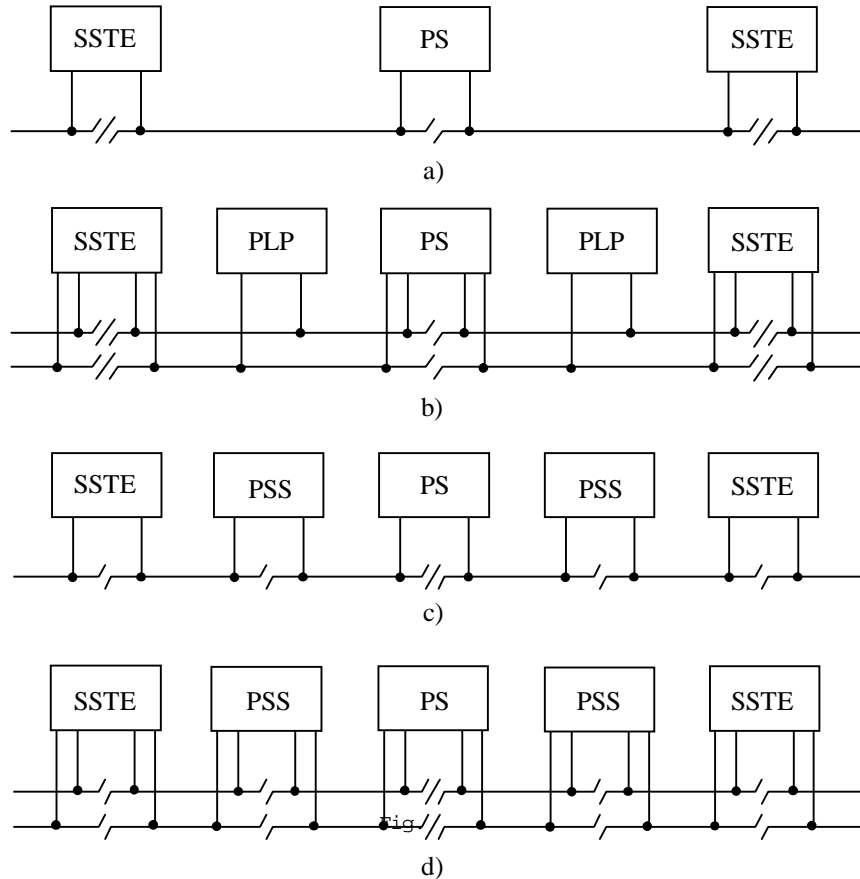
*Influența conductivă.* Cablurile electrice, conductoarele de nul și alte instalații metalice la sol sau subterane, aflate în vecinătatea căilor ferate electrificate, sunt cuplate galvanic cu circuitul de retur al curentului de tracțiune prin porțiunile comune de circuit electric din sol.

În aceste condiții, ca măsură de protecție împotriva tensiunilor de atingere și de pas, care pot deveni periculoase, îndeosebi în imediata vecinătate a LC, toate structurile metalice la sol sau subterane, situate la o distanță sub 5 m de părțile LC sub tensiune, sunt echipotențializate prin legarea lor la șina metalică a CR sau la prize de pământ (având rezistențe de trecere sub 0,5  $\Omega$ ).

### **3.4. POSTURI DE SECȚIONARE, DE SUBSECȚIONARE ȘI DE LEGARE ÎN PARALEL**

Secționarea longitudinală a LC între două SSTE adiacente, se realizează la nivelul posturilor de secționare și de subsecționare. În fig. 3.21 sunt prezentate variantele de bază ale schemelor de secționare longitudinală simplă (a, b) sau cu zonă neutră (c, d) a una (a, c), respectiv două (b, d) LC.

*Posturile de secționare (PS)* reprezintă instalații fixe, de tip exterior, amplasate pe LC aproximativ la jumătatea distanței dintre două SSTE adiacente, care permit scoaterea de sub tensiune a LC, respectiv conectarea acestuia, pentru necesități de exploatare, întreținere și protecție, în cazul CR duble, PS realizează și legarea în paralel a celor două LC.



3.21. Scheme de secționare longitudinală a LC între două SSTE adiacente.

Din punct de vedere funcțional, PS pot fi normal închise sau deschise, în cazul PS normal închise, zona fider a LC este alimentată de la două capete, adică transformatoarele de putere ale SSTE adiacente funcționează în paralel. Aceste PS sunt cele mai răspândite și au, în regim normal de alimentare, întreruptoarele și separatoarele închise. PS normal deschise se utilizează numai în cazul când transformatoarele de putere din SSTE adiacente nu pot funcționa în paralel. În aceste situații trebuie realizate zone neutre în LC lângă PS.

În fig. 3.22. este prezentată schema circuitelor primare ale PS pentru LC de c.a. monofazat corespunzătoare unei CR simple. În LC din

dreptul F1 s-a prevăzut o zonă neutră. (ZN).

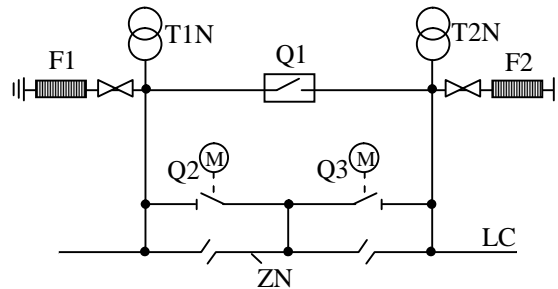


Fig. 3.22. Schema de principiu a circuitelor primare ale unui PS pentru o LC de c.a. monofazat.

Se evidențiază următorul echipament electric al circuitelor primare: un întreruptor (monopolar) sub sarcină Q1, două separatoare (monopolare) acționate cu servomotor Q2, Q3, două transformatoare de măsură de tensiune T1N, T2N, care încadrează pe Q1 și două descărcătoare cu rezistență variabilă F1, F2, pentru protecția echipamentului electric al PS împotriva supratensiunilor (atmosferice și de comutație) provenind din LC. Întreruptorul sub sarcină Q1 și separatoarele Q2, Q3 permit, în caz de intervenții sau reparații, scoaterea de sub tensiune a LC de o parte și de alta a PS. De asemenea, separatoarele Q2, Q3 asigură punerea și scoaterea de sub tensiune a zonei neutre ZN.

Transformatoarele de tensiune T1N, T2N sesizează lipsa sau prezența tensiunii în LC și, corespunzător, servesc la declanșarea automată a întreruptorului Q1 la dispariția tensiunii în LC, respectiv la anclanșarea acestuia la restabilirea tensiunii în LC, de ambele părți ale PS.

În cazul unei CR duble, PS posedă patru întreruptoare sub sarcină prin care se realizează și legarea în paralel a celor două LC.

Pentru protecția personalului de exploatare împotriva tensiunilor de atingere periculoase, în PS toate părțile metalice ale echipamentului



electric care în mod normal nu sunt sub tensiune, dar care accidental pot ajunge sub tensiune, se leagă la instalația de punere la pământ a PS.

*Posturile de subsecționare (PSS)* sunt instalații fixe exterioare, amplasate pe LC aproximativ la jumătatea distanței dintre o SSTE și un PS, care îndeplinesc atât o funcție de exploatare, asigurând secționarea longitudinală suplimentară a LC pe porțiuni mici (afectând prin aceasta foarte puțin circulația VEM neautonome cu ocazia lucrărilor de întreținere și reparație la LC) și legarea în paralel a LC în cazul CR duble, cât și o funcție de protecție, permițând localizarea automată a porțiunii defecte, în caz de scurtcircuit în LC.

În fig. 3.23 este redată schema de principiu a circuitelor primare ale unui PSS pentru LC de c.a. monofazat, corespunzătoare unei CR duble.

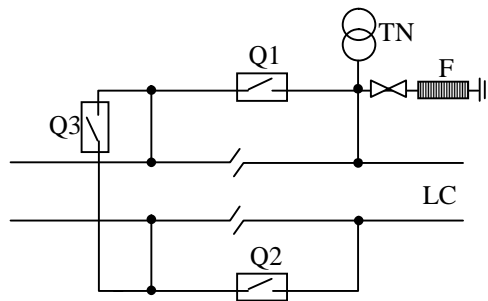


Fig. 3.23. Schema de principiu a circuitelor primare ale unui PSS pentru LC corespunzătoare unei CR duble.

Echipamentul electric al acestor circuite constă din: trei întreruptoare sub sarcină, din care două (Q1, Q2) sunt pentru secționarea longitudinală a celor două LC, iar al treilea (Q3) pentru legarea în paralel a LC, un transformator de măsură de tensiune (TN) racordat la o LC, pentru semnalizarea lipsei de tensiune în LC și un descărcător cu rezistența

variabilă ( $F$ ) pentru protecția la supratensiuni. În dreptul PSS, pe fiecare LC se prevede câte o lamă de aer, având rolul de a desface, dacă este necesar, legătura electrică dintre SSTE adiacente PSS.

Toate părțile metalice ale PSS care în mod normal nu sunt sub tensiune se leagă la instalația de punere la pământ a PSS, la care se racordează și descărcătorul cu rezistență variabilă  $F$ .

*Posturile de legare în paralel (PLP)* reprezintă instalații fixe, similare constructiv cu PS sau PSS, care se amplasează la mijlocul distanței dintre o SSTE și un PS, atunci când în schema generală a STE nu sunt prevăzute PSS (fig. 3,21, b) și care realizează o legare în paralel suplimentară a LC corespunzătoare CR duble.

Montarea PLP pe LC are ca scop asigurarea unei distribuții mai uniforme a curenților în LC de pe CR duble și obținerea unei reduceri suplimentare a căderilor de tensiune și a pierderilor de energie în LC.

PLP sunt echipate cu un singur întreruptor sub sarcină, acționate automat la apariția sau dispariția tensiunii în LC. PLP nu îndeplinesc nici o funcție de protecție. Ca și la PS sau PSS, toate părțile metalice ale PLP care în mod normal nu sunt sub tensiune se leagă la instalația de punere la pământ a PLP.

**CAPITOLUL 4**

**SISTEME DE SUSTENTAȚIE ,**  
**GHIDARE ȘI TRANSMISIE**  
**SPECIFICE VEM**

#### 4.1. SISTEME DE TRANSMISIE LA VEM PROPULSATE CU MOTOARE ELECTRICE ROTATIVE

Cu ajutorul *sistemului de transmisie* al VEM cu aderență la cale se realizează, pe de o parte, transmiterea cuplului de la motorul electric de tracțiune la roți, în scopul acționării acestora, iar, pe altă parte, protejarea motorului de tracțiune față de șocurile dinamice primite de la CR. În plus la VEM cu roți pneumatice, sistemul de transmisie asigură independența de mișcare a roților stânga-dreapta din puntea motoare.

Acțiunea roților VEM poate fi individuală, dacă fiecare osie (punte) motoare este antrenată de către un motor electric rotativ de tracțiune, respectiv colectivă (sau în grup), dacă un singur motor de tracțiune acționează simultan mai multe osii (punți) motoare. La ambele soluții de acționare, între arborele motorului de tracțiune și roțile VEM se interpune un angrenaj reductor.

Acționarea individuală a roților VEM prezintă avantajul esențial al unei siguranțe sporite în exploatare, întrucât, în cazul avarierii unui motor de tracțiune, acesta poate fi izolat, VEM funcționând în continuare cu motoarele rămase.

În plus, în cazul VEM cu mai multe motoare de tracțiune de c.c., se pot realiza diverse conexiuni (serie, serie-paralel, paralel) ale acestor motoare, în scopul obținerii unei game cât mai largi de viteze de circulație ale VEM.

La rândul ei, acționarea colectivă prin angrenaj, a roților VEM implică următoarele avantaje principale:

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- diminuarea greutateii VEM, ca urmare a repartizării puterii pe un număr mic de motoare electrice de tracțiune;
- reducerea echipamentului energetic aferent motoarelor de tracțiune;
- utilizarea mai bună a aderenței la CR, datorită cuplării mecanice a roților motoare ale VEM;
- ținuta mai bună în cale , prin dispunerea motorului electric de tracțiune în centrul boghiului (șasiului).

La VEM cu roți mecanice de tip feroviar (locomotive electrice și diesel-electrice) este, practic, generalizată soluția acționării individuale a osiilor motoare. Dimpotrivă, VEM cu roți metalice pentru transport urban (tramvaie, rame de metrou) au, uzual, sistemul de transmisie cu acționarea colectivă a osiilor motoare aparținând fiecărui boghiu (boghiu monomotor). În sfârșit, la VEM cu roți pneumatice (troleibuze, electromobile) acționarea roților stânga-dreapta din puntea motoare este tot colectivă, independența mișcării acestor roți fiind asigurată printr-un diferențial mecanic plasat între două axe planetare.

Se prezintă în continuare, variantele uzuale de sisteme de transmisie specifice VEM cu aderență la CR.

*Sistemul de transmisie la VEM de tip locomotivă diesel-electrică.*

În fig. 4.1 este redată schematic o soluție de acționare individuală prin angrenaj a osiei motoare la VEM de tip locomotivă diesel-electrică.

Motorul electric rotativ de tracțiune 1 este semisuspendat, având două puncte de sprijin direct pe osia motoare 2 prin intermediul palierelor în formă de gheare 3 și un al treilea punct de sprijin prin legătura elastică 4 (cu arcuri elicoidale sau blocuri

de cauciuc), de consola în formă de nas a cadrului boghiului 7. axele motorului de tracțiune și osiei antrenate sunt permanent paralele, la o distanță invariabilă (numită interax) între ele, asigurată prin palierul de sprijin al motorului pe osie. În fig. 4.1 s-a prezentat, de asemenea, suspensia primară elastică 9 a boghiului pe osia motoare.

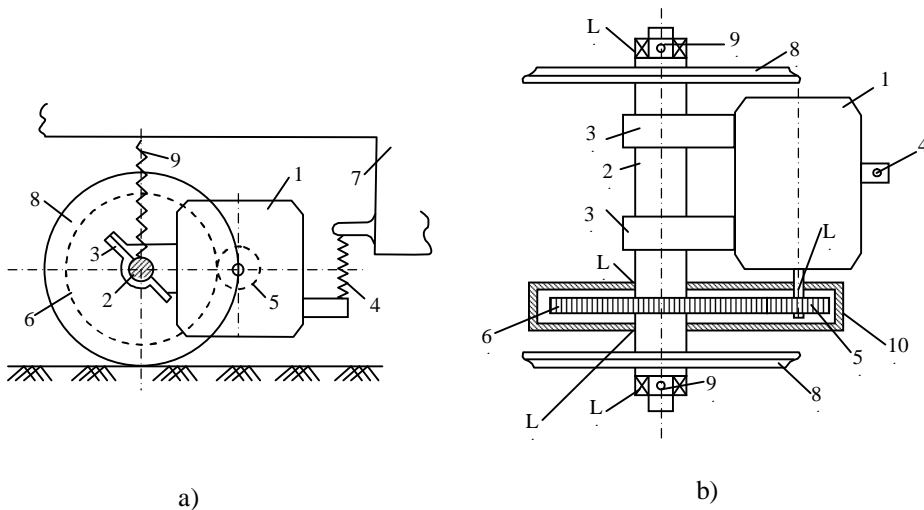


Fig. 4.1. Schema de principiu a unui sistem de transmisie la VEM de tip locomotivă diesel-electrică; (a) vedere laterală; (b) vedere de sus.

Transmiterea cuplului de la arborele motorului de tracțiune la roțile 8, solidare cu osia motoare, se realizează printr-un angrenaj cilindric (cu o singură treaptă), format din pinionul 5, fixat în capul axului motorului și roata dințată 6 calată pe osie. Angrenajul reductor este închis ermetic în carcasă, sau tobă cu ulei 10 sprijinită prin lagăre (L) pe osia motoare și pe arborele motorului de tracțiune. Soluția, aproape generalizată de transmitere a cuplului de la motorul de tracțiune la roți este cea unilaterală (fig. 4.1). Ea reprezintă pe de o parte avantajul spațiului mărit între roți, cu posibilitatea instalării unui

electromotor cu gabarit sporit, iar pe de alta parte, dezavantajul solicitării neuniforme a angrenajului și a celor două paliere de osie. Legătura elastică, dintr-un singur punct, dintre motorul de tracțiune și partea suspendată a locomotivei (suspensie „pe nas” ) reduce numai parțial solicitările dinamice provocate de neregularitățile CR. Pentru a ameliora protejarea motorului contra șocurilor provenite de la CR și, în același timp pentru a face demarajul VEM mai lin, se poate introduce, suplimentar, o anumită elasticitate de rotație în angrenaj. Totuși, deoarece 30-40 % din greutatea motorului de tracțiune semisuspendat încarcă direct osia, sporind, astfel, solicitările reciproce dintre aparatul de rulare și CR, aplicarea sistemului de transmisie din fig. 4.1 impune limitarea vitezei de circulație VEM (de exemplu, la o masă de cca. 5 tone a motorului de tracțiune, locomotiva diesel-electrică pe care acesta o echipează poate fi utilizată până la viteze de cca. 100 km/h).

### *Sistemul de transmisie elastică la VEM de tip locomotivă electrică*

În fig. 4.2 este prezentată schematic o variantă (brevetată de firma suedeză ASEA) de acționare individuală, prin angrenaj, a osiei motoare la VEM de tip locomotivă electrică.

Motorul electric rotativ de tracțiune este dispus transversal față de boghiu, având axul paralel cu osia motoare. Rotorul 1 (inclusiv colectorul, în cazul motorului de tracțiune de c.c.) este fixat pe arborele tubular 2, pe care se sprijină prin lagăre (L) și carcasa 4 a statorului 3. Motorul de tracțiune este suspendat de cadrul boghiului prin intermediul unor brațe de sprijin atașate carcasei statorice.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

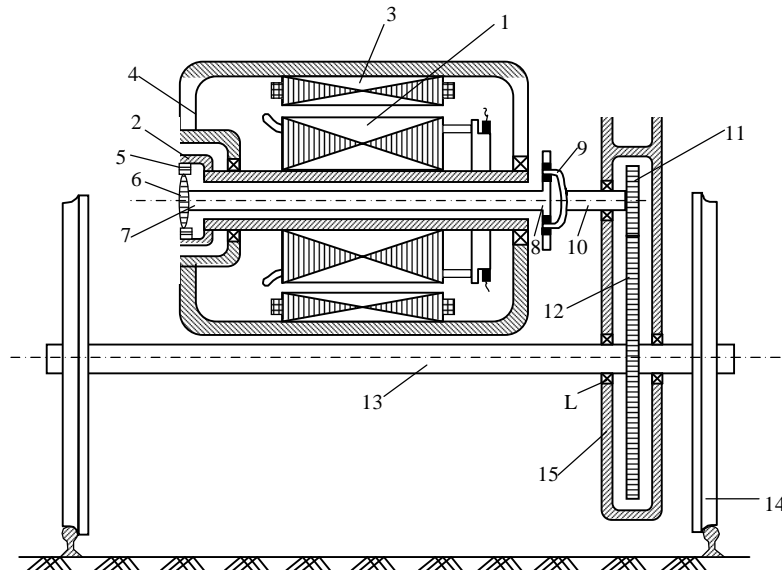


Fig. 4.2. Sistemul de transmisie elastică ASEA la VEM de tip locomotivă electrică, Schema de principiu

La capăt (cel opus colectorului în cazul motorului de tracțiune c.c.) al arborelui tubular 2 este prevăzută coroana cilindrică dințată cu dantura interioară 5, care angrenează cu roata dințată cu profil tip butoi 6, calată, la rândul ei, pe arborele de torsiune 7. Angrenajul 5-6 lucrează în ulei, toba sa fiind, evident atașată prin garnituri, atât spre interiorul arborelui gol cât și spre exterior.

La celălalt capăt al arborelui tubular 2 este prevăzut cuplajul elastic dintre motorul de tracțiune și pinionul 11 al angrenajului reductor. Acest cuplaj este realizat prin discul 8 solidar cu arborele de torsiune 7, prin butucul cu brațe 9, fretat pe axul 10 al pinionului și prin lagărele de cauciuc care fac legătura între elementele 8 și 9.

Angrenajul reductor este alcătuit din pinionul 11 și roata dințată 12, calată rigid pe osia 13 solidară cu roțile motoarelor 14.



Toba angrenajului, pe de o parte, lăgăruiește pe osia motoare 13 și pe axul 10 al pinionului, iar, pe de o parte, este prinsă elastic de cadrul boghiului (prin intermediul unui lagăr de cauciuc și al unei bielete înclinate). Acest angrenaj reductor semisuspendat lucrează în ulei, fiind prevăzut cu garniturile necesare pentru împiedicarea scurgerii uleiului.

Sistemul de transmisie din fig. 4.2 (aplicat și la motoarele electrice românești) posedă elasticitate, datorită arborelui de torsiune 7 și cuplajului 8-9 și poate prelua deplasările pe verticală între osie și motorul de tracțiune, datorită cuplajelor 5-6 și 8-9. diferența de diametre între golul rotorului tubular și arborele de torsiune este, evident, superioară amplitudinii pe verticală a oscilației suspensiei boghiului.

*Sistem de transmisie la VEM de tip ramă de metrou.*

În fig. 4.3 este redată schematic o soluție uzuală de acționare în grup, prin angrenaj a osiilor unui boghiu monomotor caracteristic VEM de tip ramă de metrou.

Motorul electric rotativ de tracțiune 1 este dispus longitudinal și suspendat de cadrul boghiului. Pe ambele capete ale arborelui motorului sunt fixate două pinioane conice 2, care angrenează fiecare cu câte o roată dințată conică 3. aceasta din urmă este calată pe un arbore tubular 5 susținut prin lagăre (L) de toba 4 a angrenajului reductor 2-3, care, la rândul ei, este fixată de carcasa motorului de tracțiune. Prin legătura elastică 7, arborele tubular 5 antrenează arborele de torsiune 6 (tot tubular), care transmite în final cuplul de rotație osiei motoare 9 și roților 10, prin cuplajul elastic (cu resorturi metal-cauciuc) 8.

Sistemul de transmisie cu boghiu monomotor, angrenaje conice și cuplaje elastice din figura 4.3 a fost adoptat de metrourele din București, Hamburg, München, Viena, Amstredam, etc. Specifică acestor metroure este și suspensia secundară (dintre cutia VEM și cadrul boghiului) cu pernă de aer, asigurând un grad ridicat de confort pasagerilor.

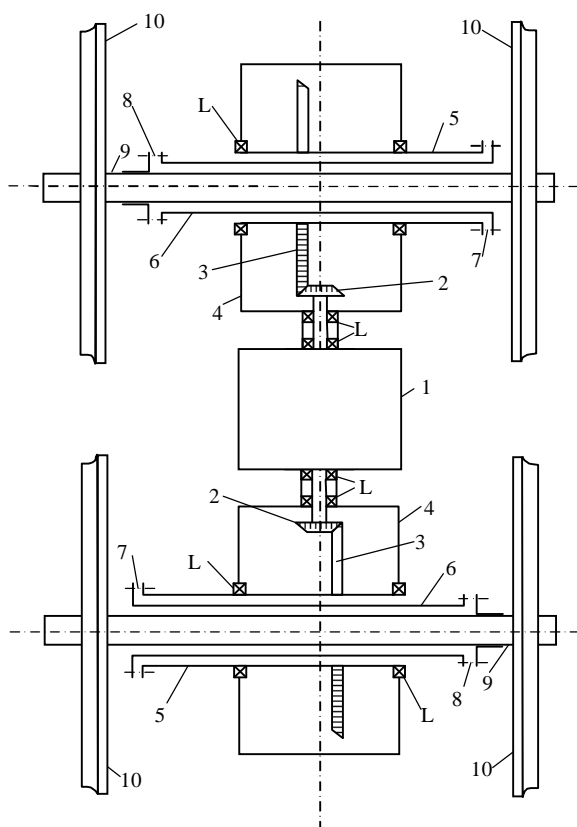


Fig. 4.3. Sistem de transmisie la VEM  
de tip rama de metrou, Schema de principiu

*Sistem de transmisie la VEM de tip troleibuz.*

La VEM cu roți pneumatice de tip troleibuz, sistemul de transmisie este realizat, uzual, conform schemei din figura 4.4

Cuplul se transmite de la motorul electric rotativ de tracțiune 1 la roțile cu pneuri 9 printr-un cuplaj cardanic dublu și o transmisie principală. Cuplajul cardanic face legătura între arborele motorului de tracțiune și flanșa pinionului de atac 5 al angrenajului reductor. Întrucât arborele motorului și pinionului nu sunt coaxiale, iar în timpul mersului VEM poziția lor relativă este variabilă, se utilizează un ax cardanic 4 prevăzut cu două articulații cardanice 3.

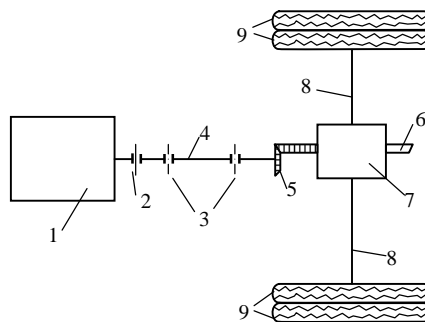


Fig. 4.4. Sistem de transmisie la VEM  
de tip troleibuz, Schema de principiu

Între motorul electric de tracțiune și cuplajul cardanic al sistemului de transmisie se interpune cupla izoantă 2. prin intermediul acesteia se mărește rezistența de izolație a instalației electrice față de caroseria troleibuzului (care, nefiind legată la pământ, poate intra accidental sub tensiune datorită unor efecte de izolație, punând în pericol de electrocutare călătorii ce urcă sau coboară din troleibuz).

Transmisia principală are rolul de a prelua cuplul de rotație de la cuplajul cardanic și de a-l transmite roților motoare duble 9. Ea cuprinde: angrenajul reductor, diferențialul mecanic și axele

planetare. Angrenajul reductor este compus din pinionul conic de atac 5, care antrenează coroana dințată conică 6, de care este fixată carcasa diferențialului mecanic 7. Dacă reductorul posedă două trepte de turație, între angrenajul conic și carcasa diferențialului se interpune un al doilea angrenaj, cu roți dințate cilindrice. Diferențialul este mecanismul care dă posibilitatea roților stânga-dreapta montate la capetele punții motoare a VEM să se rotească cu viteze diferite. Ca urmare, mișcarea este transmisă la roțile motoare nu printr-un ax comun, ci prin două axe planetare 8, între care se află diferențialul.

### **4.2. SISTEME DE SUSTENTAȚIE ȘI GHIDARE LA VEM PROPULSATE CU MOTOARE ELECTRICE LINIARE**

În cazul VEM propulsate cu motoare electrice liniare, sistemul de transmisie nu mai este necesar, întrucât forțele de tracțiune și de frânare, de natură electromagnetă, se dezvoltă direct între armăturile motorului liniar, cea inductoare fiind solidară cu VEM, iar cea indusă fiind fixată în lungul căii de circulație. Astfel, motorul electric liniar preia funcția de susținere. La limită, roțile pot fi chiar suprimate, dacă se concepe un sistem de sustentație și ghidare capabil să le substituie.

Specifică VEM cu motor liniar de tracțiune este problema asigurării unui întrefier de mărime rezonabilă și cât mai constantă între cele două armături plane ale motorului. Soluțiile unei asemenea probleme corespund, de fapt, diverselor *sisteme de sustentație (levitare) și ghidare*: cu roți, cu pernă de aer, respectiv cu pernă magnetică. În principiu, oricare dintre aceste sisteme

trebuie să îndeplinească următoarele funcții: (a) să susțină greutatea și sarcina utilă ale VEM; (b) să asigure, pe direcțiile verticală și orizontală, încadrarea mișcării VEM în limitele căii de circulație; (c) să compenseze efectul perturbațiilor exercitate asupra VEM de calea de circulație și de mediul înconjurător.

## **4.2.1. Sisteme de sustentație și ghidare convenționale (cu roți)**

Cel mai simplu sistem de sustentație și ghidare la VEM propulsate cu motoare liniare este cel convențional, prin contact mecanic roata-șină.

În cazul VEM cu viteze de circulație pînă la 150-200 km/h, acest sistem de sustentație și de ghidare prezintă avantajul unor exigențe minime impuse CR și transferului energiei electrice pe VEM.

Ca urmare, tronsoane de cale ferată și LC existente pot deveni bivalente, fiind practicabile atât pentru VEM clasice cu motoare rotative, cât și pentru VEM cu motoare liniare.

Dacă propulsia VEM este realizată cu motor asincron liniar (MAL) bilateral, se poate adopta soluția de sustentație și de ghidare cu roți (corespunzătoare, de exemplu, vehiculul experimental românesc VEMLI – 03) prezentată în fig. 4.5, a.

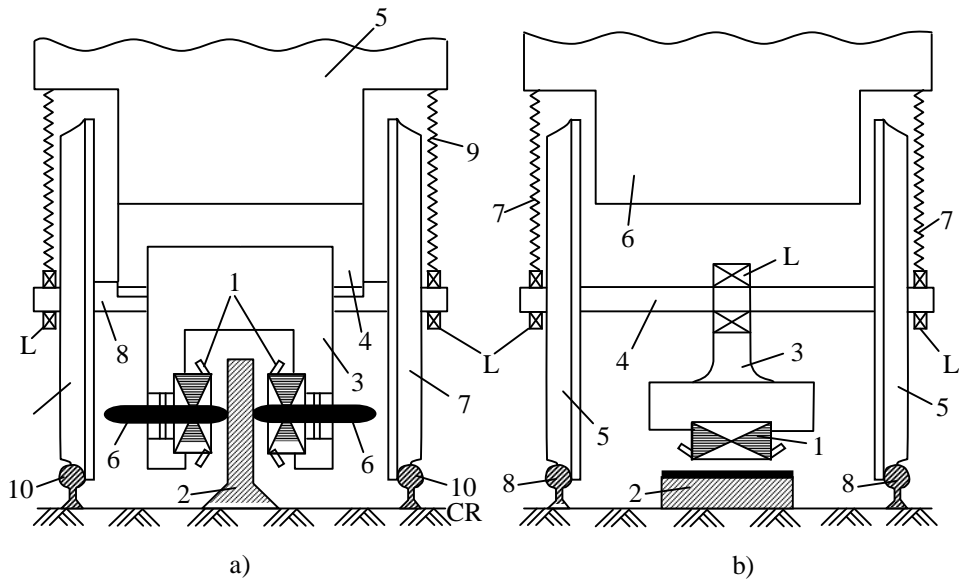


Fig. 4.5 Schema de principiu a sistemului de sustentație și ghidare convențional roată-șină la VEM cu MAL bilateral (a), respectiv unilateral (b).

Inductorul dublu 1 al MAL este suspendat de cadrul boghiului 5 prin intermediul suportului 3, care poate culisa (la deplasările laterale ale cadrului, mai ales în curbe) pe ghidajele 4, solidare cu cadrul boghiului. Indusul 2 (șina de reacție) are forma unei plăci conductoare și nemagnetice, uzual, din aluminiu, dispusă vertical (pentru reducerea influenței condițiilor climatice) în axul CR de tip feroviar. Prinderea indusului de traversele de cale ferată se poate face cu ajutorul unor profile-cornier, montate de o parte și de alta a indusului pe toată lungimea CR.

Sustentația VEM este asigurată de roțile metalice 7 (calate pe osia 8) în contact mecanic cu șinele 10 ale CR. Ghidajul lateral al VEM este realizat, practic, prin profilul bandajului roților. Suplimentar, pentru asigurarea unui întrefier cât mai redus și mai constant între armăturile MAL, sunt prevăzute rolele de ghidare 6 (câte două la fiecare din capetele inductorului dublu), care rulează

pe indusul MAL, având axele verticale prinse de suportul inductorului dublu.

În fig. 4.5 a, s-a reprezentat, de asemenea, suspensia primară elastică 9 dintre cadrul boghiului și osie.

Trebuie remarcat, că la MAL bilateral componenta repulsivă a forței normale se manifestă ca o forță de auto-concentrare, insuficientă, însă, pentru a ghida lateral VEM. În plus, repartiția acestei forțe de repulsie asupra indusului este neuniformă în direcția de mișcare utilă a VEM, determinând apariția unui cuplu în plan longitudinal, care tinde să mărească întrefierul MAL la intrare și să-l micșoreze la ieșire (așa-numitul efect de delfin).

O soluție similară de sistem de sustentație și ghidare roată șină la VEM cu MAL unilateral (corespunzătoare, de exemplu, vehiculului românesc de transport urban și suburban ROM-U-LIM-01 ) este redată schematic în fig. 4.5 b.

Sustentația și ghidarea sunt asigurate, și la acest VEM, prin roțile metalice 5 (calate pe osia 4) în contact mecanic cu șinele 8 ale CR de tip feroviar.

Particularitățile constructive ale VEM din fig.4.5 b, vizează MAL de tracțiune. Inductorul scurt 1 al acestuia este nesuspendat, fiind sprijinit pe osia 4 prin intermediul brațelor reglabile 3 și al lagărelor (L), indusul lung 2, de tip sandviș (aluminu pe fier) sau de tip scară (aluminu în miez lamelar), este fixat în axul CR feroviar. Evident, compatibilitatea indusului cu calea ferată se realizează mai ușor și mai economic la MAL unilateral, decât la cel bilateral. Reglarea întrefierului (de cca. 10-15 mm) dintre cele două armături plane orizontale ale MAL unilateral se poate face,

în funcție de uzura bandajelor roților VEM, cu ajutorul brațelor reglabile 3.

În fig.4.5 b, s-a mai reprezentat suspensia primară elastică 7 dintre cadrul boghiului 6 și osia 4.

Varianta de VEM cu MAL unilateral prezentată în fig.4.5 b, conduce la o solicitare suplimentară a osiei și a armăturii inductoare nesuspendate, precum și la o forță de tracțiune inferioară pe unitatea de lungime, comparativ cu MAL bilateral. Pe de altă parte, trebuie remarcat că MAL unilateral dezvoltă o forță normală rezultantă cu valori medii de 3-4 ori mai mare decât forța de tracțiune. Componenta repulsivă a aceste forțe normale (care poate să apară în domeniul alunecărilor mari ale MAL, corespunzătoare pornirii și fânării VEM), dacă ar fi favorizată prin proiectarea și comanda adecvate ale MAL, ar putea prelua o parte din sustentația VEM, contribuind, astfel, la descărcarea osiilor.

În mod analog, componenta de atracție a forței normale specifice MAL unilateral poate asigura (mai simplu și în întreaga zonă a alunecărilor de interes practic ale MAL) 30-50% din sustentația unui VEM de tip suspendat, circulând, de exemplu, pe șine de cale ferată dispuse pe grinzi de rulare ce reazemă pe stâlpi sau cadre de susținere.

### **4.2.2. Sisteme de sustentație și ghidare cu pernă de aer**

Principiul sustentației și ghidării VEM cu pernă de aer constă, în esență, în producerea unei diferențe de presiune față de cea atmosferică între interiorul și exteriorul unei incinte atașate VEM.



În cazul pernei de aer pozitive sau cu presiune (fig.4.6 a), aerul este refulat cu ajutorul ventilatorului 3 în camera de suprapresiune 4, aceasta este delimitată de clopotul 2 (din cauciuc sau alt material), care are ca suport placa rigidă 1. Presiunea superioară celei atmosferice creată în camera 4 determină apariția unei forțe de reacție din partea plăcii 1, cu direcție verticală și dirijată de jos în sus, care ridică (levitează) clopotul 2. Scurgerile laterale de aer pe la partea inferioară a clopotului permit stabilirea unui echilibru dinamic fără contact mecanic între clopot și placa-suport.

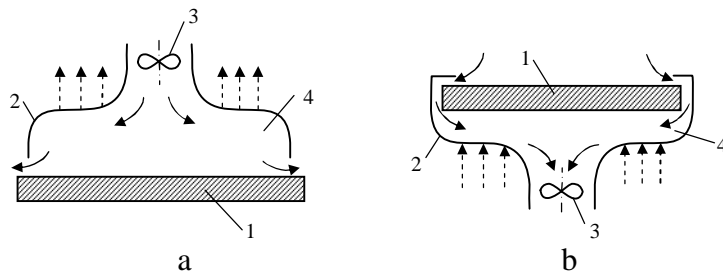


Fig. 4.6. Principiul pernei de aer pozitive (a), respectiv negative (b).

În cazul pernei de aer negative sau cu depresiune (fig.4.6 b) aerul este aspirat din camera de depresiune 4 cu ajutorul exhaustorului 3. clopotul de cauciuc 2 de tip ventuză, care delimitează camera de depresiune, nu aderă la placa rigidă 1 de la partea superioară, fiind prevăzut cu deschideri laterale de comunicare cu aerul, situate deasupra plăcii. Presiunea inferioară celei atmosferice creată în camera 4 determină împingerea în sus (levitarea) a clopotului 2 de către aerul din exteriorul acestuia. Deschiderile laterale, de deasupra plăcii, ale clopotului se măresc, astfel, progresiv, permițând obținerea unui echilibru dinamic fără contact mecanic între clopot și placa superioară.

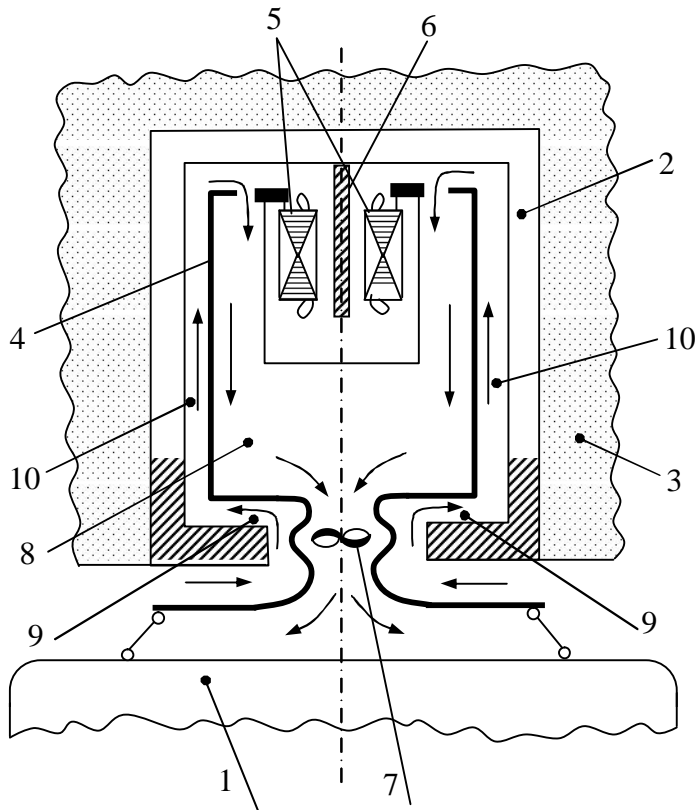


Fig. 4.7. Schema în secțiune transversală a unui VEM propulsat cu MAL bilateral, respectiv sustentat și ghidat cu pernă de aer negativă (aeroglisorul francez URBA).

În fig.4.7 s-a considerat, spre exemplificare, schema în secțiune transversală a unui VEM propulsat cu MAL bilateral respectiv sustentat și ghidat cu pernă de aer negativă (aeroglisorul experimental francez URBA pentru transport suspendat, urban și suburban).

Placa rigidă superioară 1 din fig. 4.6 b, a luat forma chesonului de oțel 2, încadrat în grinda de beton suspendată 3; chesonul constituie, în fapt, calea de zbor (CZ) a VEM. La rândul său, clopotul de tip ventuză 2 din fig. 4.6 b, a devenit culisoul 4,

ce se deplasează în interiorul și în lungul CZ (chesonului), având un rol echivalent boghiului de la vehiculele cu roți, motiv pentru care a primit și denumirea de boghiu de levitare pneumatică.

Culisoul delimitează în interiorul său camera de depresiune 8. Aceasta împreună cu exhaustorul 7 se află deasupra cutiei 1 a VEM, astfel încât centrul de greutate al ansamblului este situat sub CZ suspendată. Perna de aer 9 asigură levitarea autostabilă a VEM, iar perna de aer 10, de volum redus, deci, de mare rigiditate, permite ghidarea laterală a culisoului. Astfel, atât sustentația, cât și ghidarea VEM se realizează pneumatic, fără contact mecanic cu CZ, evidențiind confortabilitate (întrucât accelerațiile transversale, dezagreabile pentru călători, sunt puternic diminuate), silențiozitate (întrucât turbulențele generatoare de zgomot sunt absorbite de pereții camerei de depresiune) și întreținere ușoară (datorită absenței contactelor mecanice și frecărilor cu CZ).

Suspensia secundară dintre culisou (boghiu de levitare pneumatică) și cutia VEM este asigurată prin intermediul unor dispozitive elastice cu amortizoare.

În sfârșit, propulsia VEM este realizată prin MAL bilateral, având inductorul dublu 5, solidar cu culisoul, iar indusul 6, de tip placă de aluminiu, fixat în partea superioară a chesonului, și anume, în axul CZ. Suportul vertical al indusului separă în două părți camera de depresiune și, totodată, poartă conductoarele liniei trifazate de alimentare MAL și a motorului de acționare a exhaustorului. Captarea curentului electric se efectuează cu ajutorul unor perii metalo-grafitice uzuale.

În paralel cu VEM pe pernă de aer negativă (de tip URBA, din fig.4.7), au fost proiectate și realizate VEM pe pernă de aer

pozitivă, ca, de exemplu, aeroglisoarele britanice de tip HOVERTRAIN, utilizate pentru traficul de călători și transportul redus de mărfuri pe terenuri accidentate și impracticabile sau pe relații implicând alternanța repetată apă-uscă.

Trebuie remarcat că, indiferent de variantele lor tehnice, sistemele de sustentație și ghidare ale VEM nu s-au extins. Finanțarea programelor de cercetări și experimentări în această direcție a fost sistată, la mijlocul anilor 80, în majoritatea țărilor industrializate (Franța, Marea Britanie, S.U.A., Germania. etc.) sub motivația momentului economico-energetic defavorabil, în condițiile în care aceste sisteme nu răspundeau unui spor net de eficiență.

### **4.2.3. Sisteme de sustentație și ghidare cu pernă magnetică**

Ca și sistemele de sustentație și ghidare pneumatice ale VEM, cele cu pernă magnetică prezintă o serie de avantaje în raport cu sistemele convenționale (cu roți) atât la viteze de circulație moderate, corespunzătoare transportului urban, cât și la viteze de peste 200+300 km/h, corespunzătoare traficului interurban hiper-rapid:

- lipsa uzurii fricționale a căii de circulație (în fapt, CZ) datorită realizării sustentației și ghidării fără aderență la cale;

- transmiterea forțelor de sustentație și ghidare (analog celor de tracțiune și de frânare electrică), ca eforturi uniform distribuite pe suprafețe mari ale căii-suport și nu punctiform, prin contact mecanic (de exemplu, masa de 120t a unui VEM cu pernă magnetică se repartizează pe o suprafață a căii de cca. 20 m<sup>2</sup>, deci,

corespunzător unei presiuni de  $60 \text{ kN/m}^2$ , valoare însemnând  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  din cea a presiunii roată pe șină la un VEM feroviar convențional de masă echivalentă);

- ghidarea controlată, nu pasivă, a VEM față de cale, permițând raze de curbură reduse, chiar la viteze mari de circulație (uzual, sub  $4000 \text{ m}$  la  $400 \text{ km/h}$ );

- creșterea mai lentă cu viteza de transport a investițiilor alocate căii de circulație, în condiții topografice identice.

În plus, la viteze mai mari de circulație ale VEM, perna magnetică este mai rentabilă decât cea pneumatică, deoarece implică un consum energetic mai redus și nu pretinde măsuri suplimentare de insonorizare.

Uzual, sustentația și ghidarea cu pernă magnetică a VEM se realizează prin:

- *atracția magnetică* dintre electromagneți de c.c., cu miez de fier, solidari cu VEM și șine de reacție feromagnetice, fixate în lungul CZ;

- *repulsia electrodinamică* între bobine supraconductoare plane montate pe VEM și curenții induși prin mișcare în conductoare dispuse de-a lungul CZ.

*Sistemul de sustentație și ghidare cu pernă magnetică prin atracție.*

În raport cu un triedru de referință Oxyz cu originea în centrul său de greutate, VEM sustentat și ghidat cu pernă magnetică prin atracție constituie un sistem multi-electromagnet cu șase grade de libertate, corespunzătoare celor trei mișcări de rotație de translație în lungul axelor de referință și celor trei mișcări de rotație în jurul aceluiași axe (fig.4.8). Admițând că

propulsia VEM se realizează în lungul axei  $x$ , rămân pentru sustentație și ghidare cinci grade de libertate. La VEM cu pernă magnetică de atracție, construite până în prezent, sunt decuplate mecanic, pe de o parte, mișcarea de translație după axa  $Z$  de mișcările de rotație în jurul axelor  $x$ , respectiv  $y$ , iar, pe de altă parte, mișcarea de translație după axa  $y$  de cea de rotație după axa  $z$ . În plus, mișcarea de translație după  $Z$ , corespunzătoare sustentației VEM, este decuplată electric de mișcarea de translație după  $Y$ , corespunzătoare ghidării laterale a VEM, prin utilizarea de electromagneți de c.c. distincți pentru sustentație, respectiv pentru ghidare.

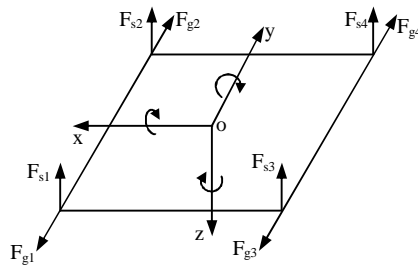


Fig.4.8. VEM cu pernă magnetică prin atracție ca sistem multi-electromagnet.

Uzual, electromagneții de sustentație/ghidare sunt în număr multiplu de patru (fig.4.8), sunt suspențați elastic de cadrul boghiului de levitare magnetică al VEM (suspensie primară) și au miezul feromagnetic masiv în formă de U, cu lungimea sub 2 m (pentru asigurarea unui întrefier uniform), cu lățimea sub 0.5 m (pentru economisirea materialului feromagnetic al șinei de reacție, care are aceeași lățime) și cu bobinajul din aluminiu răcit natural. Fiecare electromagnet de sustentație/ghidare dezvoltă, static și dinamic, o forță de atracție magnetică (notată cu  $F_s$ , respectiv  $F_g$ ,

în fig.4.8) asupra unei șine de reacție, fixată în lungul CZ și construită din fier masiv cu rezistivitate electrică mărită (pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari). La dimensionarea electromagneților de sustentație/ghidare se urmărește maximizarea atât a raportului dintre forța de atracție magnetică și greutatea electromagnetului, cât și a raportului dintre forța de atracție magnetică și consumul de putere (în principal, prin efect Joule-Lenz în bobinaj).

Perna magnetică prin atracție este instabilă static și dinamic, întrucât forța de atracție magnetică dezvoltată de electromagnetul de c.c. de sustentație/ghidare crește odată cu micșorarea întrefierului, provocând impactul VEM cu CZ. Stabilizarea se poate asigura numai prin controlul activ al curentului de excitație a electromagnetului. Conform celor precizate anterior, este posibil și preferabil ca această stabilizare electrică să se aplice fiecărui electromagnet de sustentație, respectiv de ghidare și să vizeze un singur grad de libertate, corespunzător mișcării de sustentație după direcția z, respectiv mișcării de ghidare laterală după direcția y.

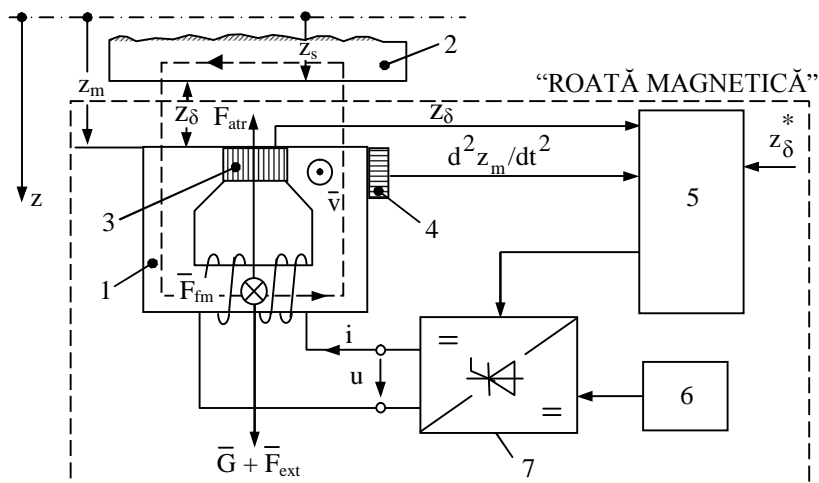


Fig. 4.9. Sistemul de sustentație cu pernă magnetică prin atracție și diagrama bloc a „roții magnetice” corespunzătoare. Schema de principiu

Unitatea funcțională de sustentație/ghidare constând dintr-un electromagnet de c.c. și echipamentul electric asociat funcționării sale stabilizate – compus, conform fig.4.9, din traductoarele 3 și 4, blocul de reglare automată 5, blocul de alimentare în c.c. 6 și variatorul static de tensiune continuă (VTC) 7 – este denumită „*roată magnetică*”. Sistemul de sustentație și ghidare cu „roți magnetice” autonome comportă o structură modulară de reglare automată, de tip descentralizat, în care fiecare electromagnet de c.c. de sustentație, respectiv de ghidare, este controlat (stabilizat) independent.

Realizarea „roții magnetice” presupune, în primul rând, proiectarea algoritmică a blocului de reglare automată aferent electromagnetului de c.c. de sustentație/ghidare. Pentru aceasta este necesară cunoașterea comportării dinamice a sistemului electromagnet-șină cu un grad de libertate. Se consideră astfel, cazul din fig.4.9 al unui electromagnet de c.c. de sustentație 1 și al șinei de reacție 2, ambele elemente ale sistemului putându-se deplasa numai după direcția verticală  $z$  (un grad de libertate), ortogonală la o axă de referință absolută.

Asupra șinei de reacție se exercită forța de atracție magnetică  $F_{atr}$  din partea câmpului magnetic (având liniile de câmp cu distribuția din fig. 4.10 și cu traseul conform liniei medii întrerupte, orientate, din fig. 4.9) produs de electromagnetul de c.c. de sustentație. Cele două întrefieruri, din dreptul polilor electromagnetului în formă de U, au aceeași valoare  $z_{\delta}$ .

Starea sistemului electromagnet-șină din fig.4.9 este perturbată de (a) poziția instantanee pe verticală a șinei, definită prin cota absolută  $z_s$  (variabilă, ca urmare a denivelărilor, curburilor și imperfecțiunilor de construcție ale CZ) și de (b) forța



exterioară  $F_{ext}$  (datorită vântului, variației încărcăturii VEM, dependenței de viteza de deplasare a forței de atracție etc.).

95

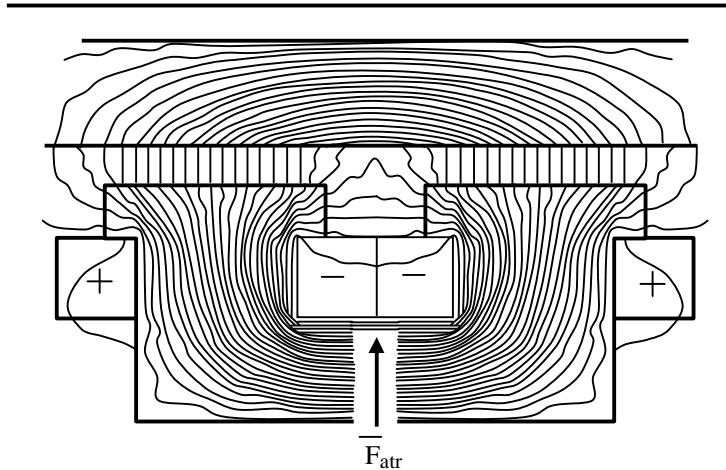


Fig. 4.10. Spectrul liniilor de câmp magnetic specific sistemului electromagnet-șină al pernei magnetice prin atracție.

Ecuatiile de bază, electrică și mecanică, ale sistemului electromagnet-șină cu un grad de libertate din fig.4.9 se pot scrie în forma generală:

$$u = Ri + d\psi/dt, \psi = \psi(i, z_\delta), F_{atr} = F_{atr}(i, z_\delta), \quad (4.1)$$

$$M(d^2 z_m / dt^2) = G + F_{ext} - F_{atr}, z_m = z_s + z_\delta \quad (4.2)$$

unde  $u$  este tensiunea de alimentare, care forțează prin bobina electromagnetului, de rezistență  $R = \text{const.}$ , curentul de excitație  $i$ ,  $\psi$  este înălțuirea magnetică a bobinei electromagnetului;  $m = \text{const.}$ , și  $c = \text{const.}$  sunt, respectiv, masa și greutatea electromagnetului;  $z_m$  este cota absolută ce definește poziția instantanee pe verticală a electromagnetului. Sistemul electromagnet-șină cu un grad de libertate, descris de ecuațiile diferențelor funcționale conținute în (4.1), variațiile admise ale întrefierului  $y_\delta$  fiind, însă, relativ mici, sistemul se poate liniariza

(după tangentă) în jurul punctului de funcționare  $\Lambda^*$  corespunzător întrefierului prescris  $z_\delta^*$  (uzual de cca. 10mm). Rezultă:

$$\Delta u = R\Delta i + d(\Delta \psi)/dt, \Delta \psi = k_i\Delta i - k_\delta\Delta z_\delta, \Delta F_{atr} = c_i\Delta i - c_\delta\Delta y_\delta \quad (4.3)$$

$$md^2(\Delta z_m)/dt^2 = -\Delta F_{atr} + \Delta F_{ext}, \Delta z_m = \Delta z_s + \Delta z_\delta, \quad (4.4)$$

unde  $\Delta \lambda$ ,  $\lambda = u, i, \psi, z_\delta, F_{atr}, z_m, F_{ext}, z_s$ , definesc variațiile mici ale mărimilor caracteristice sistemului electromagnet-șină în raport cu valorile lor corespunzătoare punctului de funcționare  $\Lambda^*$  și unde  $k_i = \partial \psi / \partial i$ ,  $k_\delta = -(\partial \psi / \partial z_\delta)$ ,  $c_i = \partial F_{atr} / \partial i$ ,  $c_\delta = -(\partial F_{atr} / \partial z_\delta)$  sunt evaluate în punctul de funcționare  $\Lambda^*$  și reprezintă constante strict pozitive, determinabile pe cale experimentală [35]. Se preferă, transcrierea sistemului liniarizat în variații mici față de  $\Lambda^*$  (4.3),(4.4), sub forma canonică a ecuațiilor matriceale intrare-stare-ieșire:

$$dX/dt = AX + B\Delta u + EZ \quad (4.5)$$

$$Y = CX, \quad (4.6)$$

unde, corespunzător alegerii uzuale,  $X = [\Delta z_\delta, d(\Delta z_\delta)/dt, d^2(\Delta z_m)/dt^2]^T$ ,  $Y = [\Delta z_\delta, d^2(\Delta z_m)/dt^2]^T$ ,  $Z = [\Delta F_{ext}, d(\Delta F_{ext})/dt, d^2(\Delta z_s)/dt^2]^T$  reprezintă vectorul variabilelor de stare, mărimilor de ieșire, respectiv perturbațiilor, iar  $\Delta u$  este mărimea de comandă a sistemului:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_\delta R}{k_i m} & \frac{c_\delta}{m} - \frac{c_i k_\delta}{k_i m} & -\frac{R}{k_i} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{c_i}{k_i m} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \frac{R}{k_i m} & \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Sistemul electromagnet-șină liniarizat în jurul punctului de funcționare corespunzător întrefierului prescris  $z_{\delta}^*$ , având modelul matematic de descriere de ordinul 3 (4.5), (4.6), nu satisface condiția necesară de stabilitate, care pretinde pozitivitatea tuturor coeficienților polinomului său caracteristic.

$$\det(pI_3 - A) = p^3 + (R/k_i) p^2 + [(c_i k_{\delta} / k_{im}) - c_{\delta} / m] p - (c_{\delta} R / k_{im}) \quad (4.8)$$

Într-adevăr se observă imediat că  $-(c_{\delta} R / k_{im}) < 0$ . Sistemul liniarizat local în variații mici fiind instabil, rezultă (conform primei metode a lui Liapunov), că sistemul neliniar electromagnet-șină cu un grad de libertate este instabil dinamic, așadar, trebuie controlat în circuit închis.

De aici decurg sarcinile locului său de reglare automată: (a) să mențină întrefierul  $z_{\delta}$  la valoarea prescrisă  $z_{\delta}^*$  (corespunzătoare punctului de funcționare  $\Lambda^*$ ), în condițiile acțiunii perturbațiilor, dar, totodată, (b) să asigure un grad satisfăcător de confortabilitate și un consum energetic cât mai redus.

În acord cu sarcinile anterioare, proiectarea algoritmică a blocului de reglare automată aferent sistemului neliniar electromagnet-șină cu un grad de libertate se poate obține ca soluție a problemei de stabilizare optimală formulată pentru sistemul liniarizat în variații mici (4.5), (4.6) [3,7,19].

Această problemă constă în determinarea legii de comandă după stare,

$$\Delta u(t) = KX(t), \quad (4.9)$$

astfel încât (a) sistemul rezultat prin introducerea lui (4.9) în (4.5) – (4.6) să fie asimptotic stabil și, în același timp, (b) criteriul integral liniar pătratic

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{Y}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{Y}(t) + \Delta u^2(t)) dt, \text{ cu } \mathbf{Q} > 0, \quad (4.10)$$

să ia valoarea minimă. Soluția problemei de mai sus,

$$\Delta u(t) = k_p \Delta z_{\delta}(t) + k_v d(\Delta z_{\delta}(t)/dt) + k_a d^2(\Delta z_m(t))/dt^2, \quad (4.11)$$

corespunde unui compensator (sau regulator proporțional) de stabilizare optimă cu matricea  $\mathbf{K} = [k_p, k_v, k_a]$ , ai cărei coeficienți constanți se determină în condițiile de adoptare prealabilă a valorilor matricei  $\mathbf{Q}$  și de restricții suplimentare datorate limitării superioare a amplificării pe canalele compensatorului [13,18].

Variabila de stare  $d(\Delta z_{\delta})/dt$  nu reprezintă o mărime de ieșire, nefiind accesibilă măsurării directe. În consecință, pentru asigurarea legii de comandă optimă (4.11), este necesară introducerea unui observator (sau estimator) de stare, adică a unui sistem dinamic, care să furnizeze o estimată  $d(\Delta \hat{z}_{\delta})/dt$  a mărimii de stare  $d(\Delta z_{\delta})/dt$  cu ajutorul mărimilor de ieșire  $\Delta z_{\delta}$  și  $d^2(\Delta z_m)/dt^2$  (măsurabile prin traductorul de întrefier 3, respectiv accelerometrul 4, din fig. 4.9). Rezultă, astfel, structura blocului de reglare automată cu compensator de stabilizare optimă și observator de stare, din fig. 4.11 a. Vectorul  $\mathbf{Y}$  al mărimilor de ieșire din sistemul electromagnet-șină are acces direct în observatorul de stare, care, la rândul său furnizează la intrarea compensatorului vectorului de stare estimat  $\hat{\mathbf{X}} = [\Delta z_{\delta}, d(\Delta \hat{z}_{\delta})/dt, d^2(\Delta z_m)/dt^2]^T$ .

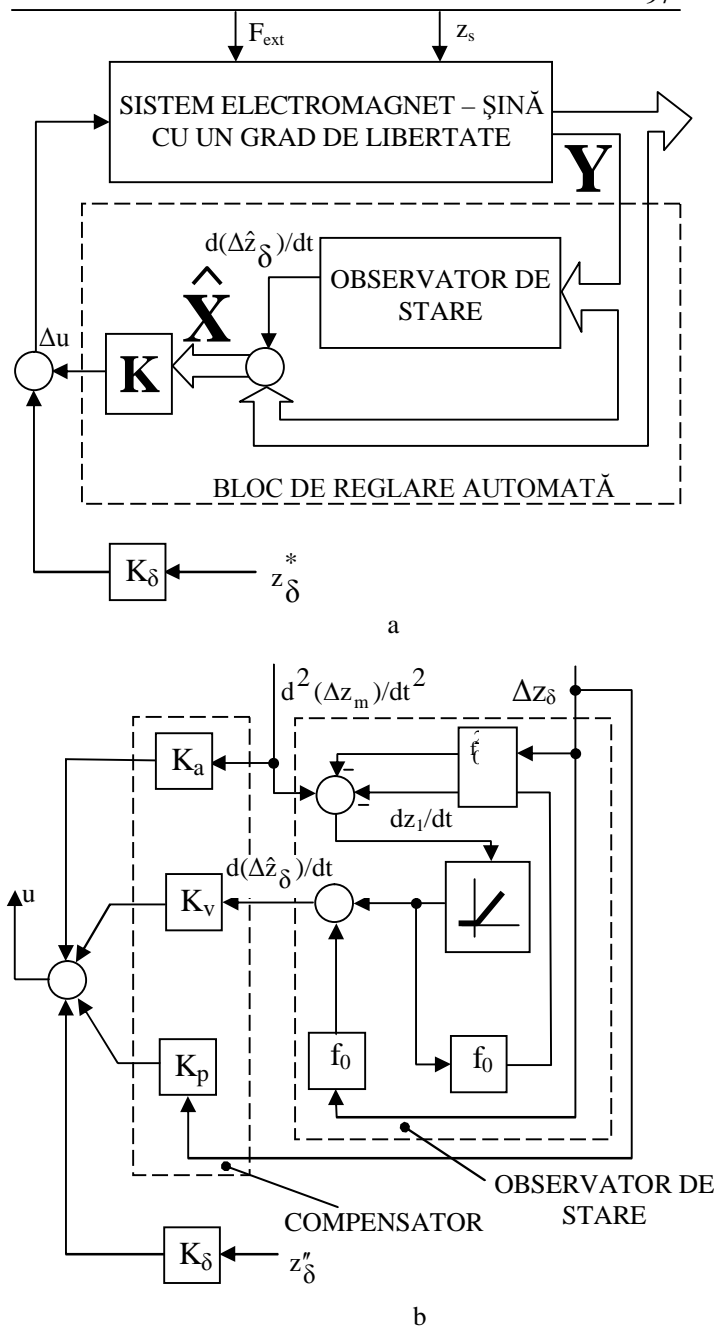


Fig.4.11 (a) Diagrama structurală a blocului de reglare automată aferent sistemului electromagnet-șină cu un grad de libertate, (b) variantă detaliată.

Mărimea de ieșire a blocului de reglare automată este variația  $\Delta u$  a tensiunii de comandă, care se adaugă unei tensiuni  $U^*$  proporționale cu întrefierul prescris  $z_\delta^*$ . După cum se poate constata din fig. 4.11a, blocul de reglare automată, proiectat pentru sistemul liniarizat local în variații mici (4.5),(4.6), a fost conectat direct la sistemul neliniar electromagnet-șină cu un grad de libertate pe care, astfel, îl stabilizează optimal, în jurul punctului de funcționare corespunzător valorii prescrise  $z_\delta^*$  a întrefierului.

În fig. 4.11b, se prezintă o variantă structurală, detaliată a blocului de reglare automată cu compensator de stabilizare optimală și observator de stare de ordinul I de tip Luen Berger, având polul  $(-f_0)$  și ecuațiile de descriere:

$$dz_1/dt = -f_0 z_1 - f_0^2 \Delta z_\delta - d^2(\Delta z_m)/dt^2, d(\Delta \dot{z}_\delta)/dt = z_1 + f_0 \Delta z_\delta. \quad (4.12)$$

această variantă uzuală de proiectare a blocului de reglare automată din cadrulul „roții magnetice” de sustentație/ghidare asigură atât stabilitatea sistemului electromagnet-șină, cât și comportarea lui satisfăcătoare, în raport cu perturbațiile. Se pot desigur, proiecta observatori cu structură mai complexă, care să estimeze nu numai mărimea de stare  $d(\Delta z_\delta)/dt$ , ci și variațiile mici  $\Delta F_{ext}$ ,  $d(\Delta F_{ext})/dt$  ale perturbațiilor necunoscute, dar cu o dinamică anticipabilă [61].

„Roata magnetică” de sustentație/ghidare descrisă mai sus, nu poate asigura, la viteze mari de circulație, condițiile standard de confort de zbor magnetic impuse VEM. De aceea, ea trebuie completată cu o suspensie secundară adecvată (uzual, de tip pneumatic), amplasată între boghiul de levitare magnetică și cutia VEM. În plus, având în vedere posibilitatea unor staționări prelungite sau situații critice ale VEM cu pernă magnetică prin

atracție, este necesar să se prevadă un sistem auxiliar convențional cu roți (sau patine) de sustentație/ghidare a VEM.

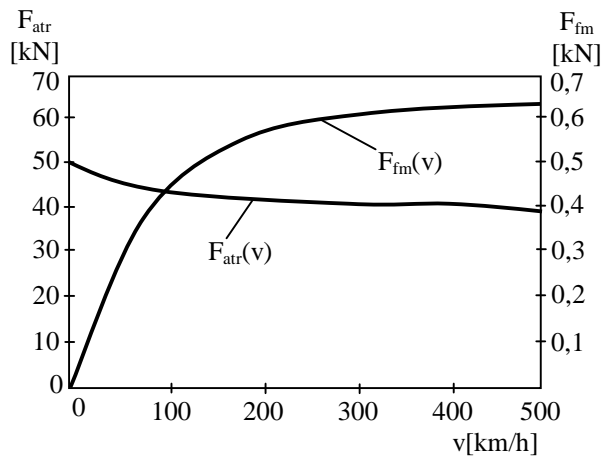


Fig.4.12. Variația funcție de viteză a forțelor caracteristice pernei magnetice prin atracție.

În timpul mișcării utile (zborului magnetic) , cu pernă magnetică prin atracție, curenții turbionari induși dinamic de câmpul magnetic al electromagneților de sustentație și ghidare în șina de reacție a CZ au ca efect reducerea forței nete de atracție magnetică (cu până la 25 ÷ 35%, la viteze de cca. 400 km/h ) față de valoarea sa de repaus (fig.4.12). aceiași curenți turbionari produc și o forță de frânare magnetică, având sensul opus mișcării utile a VEM (fig.4.9) și modulul monoton crescător cu viteza de deplasare a VEM (până la cca. 400 km/h) (fig.4.12). Întrucât această forță reprezintă 5÷10% din forța de tracțiune necesară accelerării, ea trebuie luată în considerare la proiectarea sistemului de propulsie al VEM cu pernă magnetică prin atracție.

Este de remarcă că la vehiculele actuale cu pernă magnetică prin atracție, destinate transportului urban și interurban de mare viteză, s-a adoptat integrarea funcțiilor de sustentație și

propulsie, pe principiul fie al motorului liniar sincron homopolar (ca în cazul vehiculelor experimentale românești din familia MAGNIBUS), fie al motorului sincron liniar cu excitație heteropolară convențională și cu cale activă (ca în cazul vehiculului operațional vest-german TRANSRAPID-06). Spre exemplificare în fig. 4.10 este prezentată schematic structura unui VEM din familia MAGNIBUS.

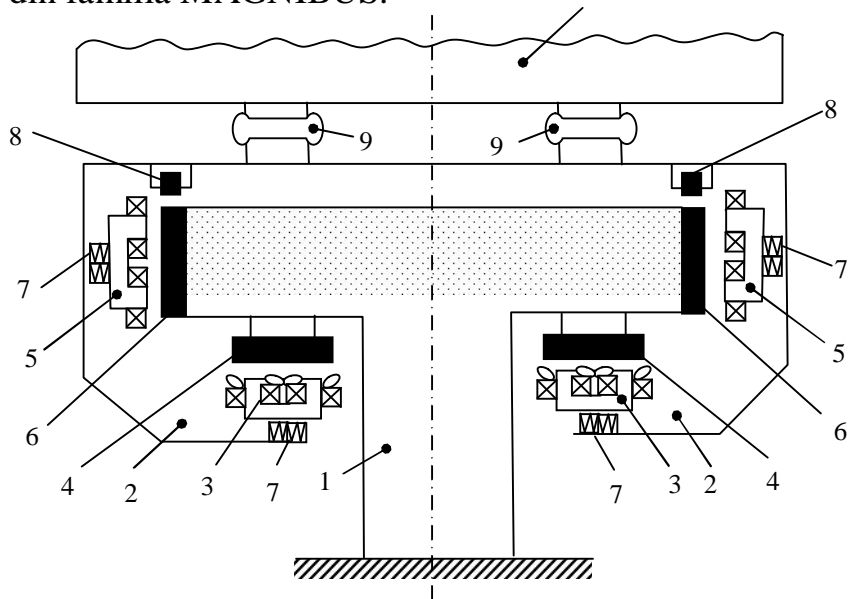


Fig.4.13 Schema în secțiune transversală a unui VEM cu pernă magnetică prin atracție (din familia MAGNIBUS).

Propulsia VEM se realizează cu motor liniar sincron homopolar avînd :

- inductorul 3 montat pe VME și prevăzut cu un miez din tole pe care sunt dispuse bobine homopolare de excitație și înfășurare trifază;
- indusul cu reluctanță variabilă 4, montat în lungul căii de zbor 1 sub forma unor segmente feromagnetice masive înglobate în beton.



Motorul liniar sincron homopolar poate fi utilizat ca sistem integrat de propulsie și sustentație, întrucât excitația sa homopolară în interacțiune cu calea feromagnetică segmentată poate asigura forța de atracție magnetică, necesară sustentației VEM. Ghidarea laterală a VEM se realizează cu electromagneții de c.c. controlați 5 și plăcile feromagnetice 6, montate pe laturile verticale ale CZ.

Suspensia primară elastică 7 asigură susținerea de cadrul boghiului de levitare magnetică 2, atât a inductoarelor motoarelor liniare sincrone homopolare, cât și a electromagneților de c.c. de ghidare. Între boghiul de levitare și cutia 10 a VEM este prevăzută suspensia secundară pneumatică 9.

În cazul unor staționări prelungite ale VEM sau al unor situații critice când sustentația magnetică prin atracție nu funcționează, VEM se poate sprijini pe CZ prin roțile de siguranță 8.

*Sistemul de sustentație și ghidare cu pernă magnetică prin repulsie.*

Sustentația și ghidarea VEM prin forțe de repulsie electrodinamică reclamă instalarea pe VEM a unor bobine inductoare cu solenații deosebit de mari ( $500 \div 800 \text{ kAs}$ ), capabile să creeze într-un întrefier de  $100 \div 150 \text{ mm}$  (cu un ordin de mărime superior celui din cazul pernei magnetice prin atracție) câmpuri magnetice suficient de intense (pentru a asigura și propulsia VEM). Asemenea bobine nu pot fi realizate convențional (din conductoare de cupru sau aluminiu), întrucât pierderile de putere ar fi intolerabil de mari. Ca atare, este necesară utilizarea unor bobine inductoare din material supraconductor (uzual,

microfilamente de NbTi într-o matrice de cupru), menținut la temperaturi subcritice (de cca. 5k) în instalații criogenice cu heliu lichid. Pierderile de putere în bobinele supraconductoare, în cazul, de exemplu, al unui VEM de 10 t, nu depășesc 10 W .

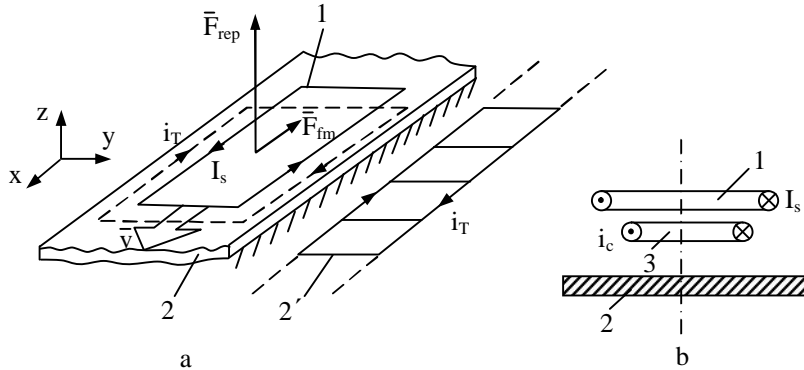


Fig.4.14 Schema de principiu a sistemului de sustentație cu pernă magnetică prin repulsie (a) și a amortizorului său electric activ de stabilizare dinamică (b).

Perna magnetică repulsivă de sustentație, respectiv de ghidare este stabilă static, deoarece forța de repulsie electrodinamică crește în cazul apropierii bobinelor supraconductoare de CZ. Într-adevăr, considerând sistemul de sustentație (levitație) magnetică prin repulsie reprezentat schematic în fig. 4.14 a, bobina supraconductoare inductoare 1, mobilă cu viteza  $\vec{v}$  a VEM și parcursă de curentul constant  $I_s$ , induce prin mișcarea curentului  $i_t$  în placa-indus 2 (respectiv, scara-indus 2') conductoare, dispusă în lungul CZ. Forța de repulsie electrodinamică dintre bobina inductoare și circuitul electric, echivalent al indusului este dirijată în sensul pozitiv al axei z a triedrului de referință adoptat în fig.4.14 a, și are expresia:

$$F_{rep} = (\partial W / \partial z) = I_s i_t (\partial M / \partial z) \quad (4.13)$$

unde,  $W$  reprezintă energia electromagnetică înmagazinată în circuitul inductor și cel echivalent al indusului,

$$V = L_s I_s^2 / 2 + L_T i_T^2 / 2 + M I_s i_T, \quad (4.14)$$

$L_s$  și  $L_T$  fiind inductanțele proprii (independente de  $z$ ) ale celor două circuite, iar  $M$ , inductanța lor mutuală. La viteze suficient de mari ale VEM, rezistența electrică a circuitului echivalent al indusului și fluxul magnetic total prin acest circuit se pot neglija (în conformitate cu fig.4.15d, corespunzătoare unei perne magnetice prin repulsie eficace), adică:

$$M I_s + L_T i_T = 0 \quad (4.15)$$

Din relațiile anterioare (4.13) și (4.15) rezultă

$$F_{rep} = - I_s^2 E (\partial M / \partial z) / L_T \quad (4.16)$$

și în final

$$\begin{aligned} (\partial F_{rep} / \partial z) &= - (I_s^2 / L_T) [(\partial M / \partial z)^2 + M (\partial^2 M / \partial z^2)] \cong \\ &\cong - (I_s^2 / L_T) (\partial M / \partial z)^2 < 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

inegalitatea ce probează stabilitatea statică a sistemului de sustentație (levitație) magnetică prin repulsie considerată.

La viteze peste 60÷80 km/h perna magnetică prin repulsie, de sustentație, respectiv de ghidare, devine dinamic instabilă, prezentând oscilații pe direcție ortogonală la CZ nearmonizate în timp. În scopul atenuării acestor oscilații și asigurării unui confort satisfăcător de zbor magnetic este suficient un amortizor electric activ. Aceasta se poate realiza, în cazul sistemului de sustentație, (levitație) magnetică din fig. 4.14a sub forma unei bobine convenționale de control 3, montată pe VEM sub bobina subconductoare, inductoare 1 (dar, deasupra plăcii-indus 2) și parcursă de un curent  $i_c$  proporțional cu viteza mișcării verticale [13,15] (fig.4.14 b).

Sistemul de sustentație (respectiv, ghidare) magnetică prin repulsie nu este capabil să leviteze (respectiv, să ghideze lateral) VEM decât la viteze peste 40÷80 km/h., întrucât forța de repulsie electrodinamică este nulă în repaus (fig.4.15 a) și crește monoton cu viteza peste valoarea-limită (fig.4.16), ca urmare pe distanțele de accelerare și decelerare sustentația (respectiv, ghidarea) VEM se realizează cu roți pneumatice retractabile, asemănătoare celor utilizate de avioane la trenurile de aterizare.

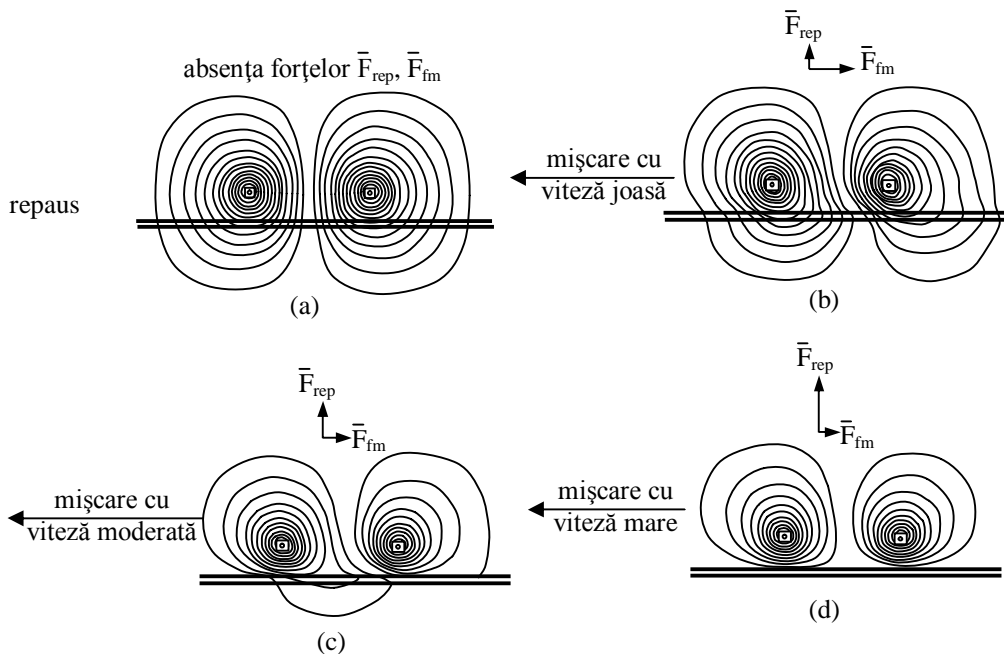


Fig.4.15 Spectrul liniilor de câmp magnetic și forțele specifice sistemului reprezentat de o bobină supraconductoare inductoare în mișcare deasupra unei plăci-indus conductoare.

Curenții induși prin mișcare în placa (sau scara) conductoare a CZ generează o forță de frânare magnetică  $\bar{F}_{fm}$ , de sens opus mișcării utile avem (fig.4.14a și 4.15b,c,d) și de modul variabil cu viteza de circulație a VEM (fig.4.15b,c,d și 4.16).

Maximul bine conturat al acestei forțe la viteze reduse (uzual, sub 50 km/h) (fig 4.16) pe de o parte, înrăutățește demarajul vehiculelor cu pernă magnetică prin repulsie, iar pe de altă parte, favorizează frânarea lor înainte de oprirea în stații.

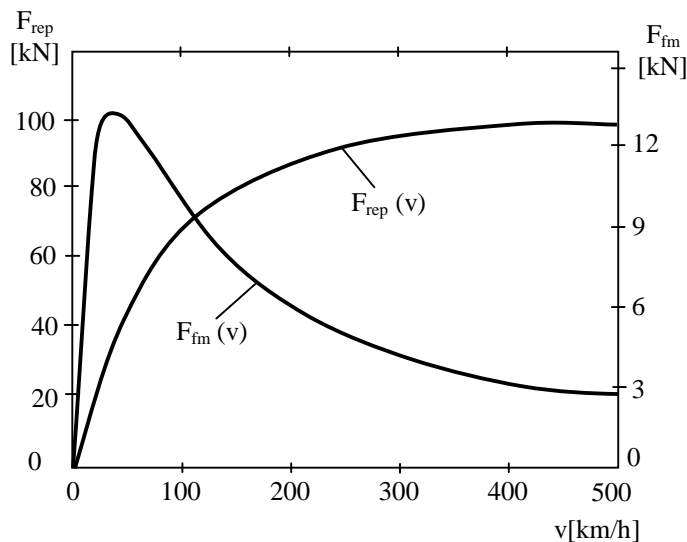


Fig.4.16 Variația cu viteza a forțelor caracteristice pernei magnetice prin repulsie

La viteze de peste 400 km/h, forța repulsivă de sustentație (respectiv, de ghidare) obține valorile mari din preajma celei limită, iar forța de frânare magnetică devine suficient de redusă (fig.4.16), aceste avantaje alături de cel al unui întrefier relativ mare (100 ÷ 150 mm ) impun soluția sustentației ( și/sau ghidării) magnetice propulsive pentru VEM hiper-rapide, chiar dacă bobinele supraconductoare și instalațiile criogenice aferente au încă un cost prohibitiv.

Sustentația (levitația) și ghidarea laterală a vehiculelor operaționale cu pernă magnetică prin repulsie se realizează separat, prin sisteme distincte. Astfel, sustentația magnetică se

asigură cu bobine supraconductoare, montate orizontal pe boghiul de levitare al VEM și cu conductoare dispuse tot orizontal în lungul CZ iar ghidarea magnetică laterală se obține prin intermediul unor bobine supraconductoare verticale, solidare cu VEM și a unor conductoare montate de-a lungul ambelor laturi verticale ale CZ (care are formă de U sau de T răsturnat ).

Trebuie remarcat, că la vehiculele actuale cu pernă magnetică prin repulsie (în speță trenul experimental japonez de mare viteză MLU-001 realizat și testat de Japanese National Railways) s-a optat pentru integrarea funcțiilor de ghidare laterală și de propulsie, pe principiul motorului sincron liniar cu excitație heteropolară supraconductoare.

## **CAPITOLUL 5**

### **VEM ALIMENTATE ÎN CURENT CONTINUU (VEMC)**

## INTRODUCERE

STE cu VEMC se utilizează cu precădere în transportul urban, pentru care este rezervată tensiunea în LC de 750 sau 600 de V c.c. Ca urmare, VEMC se consideră vehicule de mică și medie putere (100 ÷ 600 kW), de tip tramvai, troleibuz și ramă de metrou, având principalele caracteristici rezumate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Tipul VEMC	Capacitatea de transport (călători/oră și sens)	Lungimea medie a interstației (km)	Viteza medie de circulație (km/h)	Accelerația la demaraj și decelerația la frânare (m/a <sup>2</sup> )
ramă de metrou	20000 ÷ 50000	1 ÷ 3	25 ÷ 40	1.2 ÷ 1.5
tramvai	5000 ÷ 20000	0.6 ÷ 1	15 ÷ 30	0.6 ÷ 1.2
troleibuz	1500 ÷ 5000	0.4 ÷ 0.6	15 ÷ 25	0.8 ÷ 1.3

O particularitate a VEMC este că, în regim de tracțiune, din domeniul lor de viteze cca. 1/3 se acoperă prin funcționarea la cuplu constant (respectiv, forță de propulsie constantă) a motoarelor electrice rotative (respectiv, liniare) de tracțiune, iar restul de cca. 2/3 corespunde funcționării la putere constantă a acestor motoare. Valoarea maximă a forței de tracțiune este impusă de aderență (la VEMC cu roți) și de limita admisă pentru curentul motoarelor electrice de tracțiune. La rândul ei, valoarea maximă a vitezei de deplasare utilă a VEMC corespunde limitei admise pentru turația (respectiv, viteza liniară) motoarelor de tracțiune (fig.5.1).

În regim de frânare electrică, pe aproape întregul domeniu de viteze al VEMC funcționarea motoarelor electrice rotative



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

(respectiv, liniare) de tracțiune se face la cuplu constant (respectiv, forță de frânare constantă) (fig.5.1).

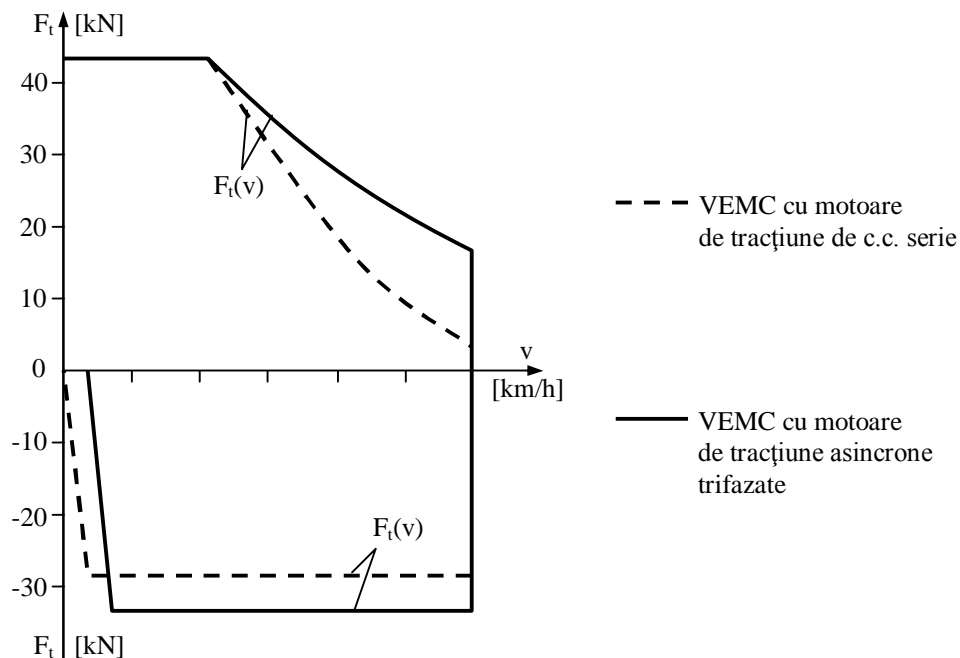


Figura 5.1. Caracteristici de viteză ale forței de tracțiune și forței de frânare electrică specifice VEMC.

Dintre exigențele actuale impuse VEMC (de transport urban) cele mai importante sunt:

- minimizarea consumului de energie electrică în fazele de demaraj, relativ frecvente;
- asigurarea frânării electrice combinate, recuperativ-reostactice, prin care energiile de frânare, relativ mari, pot fi returnate în LC, respectiv disipate în reostatul de frânare, atunci când LC nu este receptivă;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- eliminarea, pe cât posibil, a elementelor de conectare electromecanice în regim de frânare electrică și, mai ales, la trecerea de la un regim la celălalt;

- introducerea electronicii de putere și de informație în echipamentul VEMC, în scopul reglării continue și rapide a forței de tracțiune, respectiv de frânare electrică, în toată gama de viteze a VEMC.

Sistemul de propulsie al VEMC poate fi realizat cu motoare de tracțiune de c.c. cu excitație serie (alimentate de la LC direct sau prin VTC ), respectiv asincrone trifazate, rotative sau liniare (alimentate de la LC prin IT). În exploatare, aceste motoare sunt supuse la o serie de constrângeri și solicitări.

Astfel, principalele constrângeri de exploatare sunt: gabarit limitat; greutate cât mai redusă; viteză maximă ridicată; accesibilitate ușoară pentru întreținere, revizie și reparație; porniri și frânări frecvente, cu accelerații, respectiv decelerații, mari; rentabilitate economică în condiții date de circulație a VEMC și de profil al căii.

Solicitățile mecanice la care este supus sistemul de propulsie al VEMC se datorează atât eforturilor variabile de tracțiune (porniri și frânări frecvente, profil al căii cu declivități și curbe, suprasarcini mecanice de durată etc.), cât și șocurilor dinamice primite de la calea de circulație (ca urmare a denivelărilor, joantelor, macazelor etc.).

La rândul lor, solicitările electrice se datorează fluctuațiilor tensiunii continue de alimentare din LC (uzual, între limitele -30% și +20 % din tensiunea nominală), precum și "poluării" cu armonici a LC.

Motoarele de tracțiune ale VEMC admit solicitări termice ridicate, mai mari decât la mașinile electrice normale, întrucât, pe de o parte, în exploatare temperaturile limită prescrise la standul de încercări la care sunt supuse motoarele de tracțiune se efectuează (din considerente de siguranță a circulației) la intervale de timp inferioare duratei de îmbătrânire a izolației electrice.

Motoarele de tracțiune, în ansamblu, trebuie să facă față unor solicitări importante datorate mediului în care lucrează; fiind plasate sub VEMC, ele sunt expuse stropirii cu apă, zăpezii, umidității atmosferice, prafului etc.

În sfârșit, motoarele de tracțiune ale VEMC alimentate de la LC prin convertoare statice de putere (VTC și IT) suportă o serie de solicitări suplimentare, mecanice (vibrații, cupluri parazite etc.), electrice (tensiuni între arborele rotoric și scuturile port-lagăre, comutație degradată, în cazul motoarelor de tracțiune de c.c. serie etc.) și termice (pierderi suplimentare în fier și în înfășurări), datorate armonicilor și vitezelor mari de variație ale tensiunii și /sau curentului de ieșire din convertor.

Existând, așadar, solicitări foarte variate în exploatare, prin standardizare internațională s-au adoptat două servicii pe care motoarele electrice de tracțiune trebuie să le suporte la standul de încercări:

- *serviciul continuu* (sau de durată), care corespunde unei sarcini ce poate fi suportată timp îndelungat, fără a se depăși limitele admise pentru încălzire;

- *serviciul uniorar*, care corespunde unei sarcini ce poate fi suportată timp de o oră, fără a se depăși limitele admise pentru încălzire. Corespunzător celor două servicii, se definesc două puteri caracteristice: puterea continuă ( $P_c$ ) și puterea uniorară ( $P_h$ ).

Raportul lor,  $K_d = P_c / P_h$ , desemnează coeficientul de durată și are la motoarele de tracțiune specifice VEMC valorile uzuale  $0.6 \div 0.85$ .

### **5.1.VEMC PROPULSATE CU MAȘINI DE TRACȚIUNE DE C.C. SERIE**

#### **5.1.1. Specificul mașinilor de tracțiune**

Motorul de c.c. cu excitație serie este de mult aplicat la propulsia VEMC, datorită particularităților sale funcționale deosebit de avantajoase pentru tracțiune:

- prezintă o caracteristică mecanică elastică (suplă) cu autoreglare de turație (adică, la sarcini mecanice reduse la ax corespund turații ridicate, iar la sarcini mari corespund turații mici);

- dezvoltă cupluri puternice la porniri și frânare, putând imprima accelerații, respectiv decelerații, mari;

- suportă bine suprasarcini și șocuri dinamice la ax;

- turația sa poate fi modificată simplu, în limite largi;

- atenuează, pe partea rețelei de c.c. de alimentare, variațiile încărcării mecanice la ax (ceea ce la STE cu VEMC are repercusiuni favorabile privind limitarea suprasarcinilor din SSTE și a căderilor de tensiune în LC);

- poate fi ușor trecut în regim de generator de c.c. serie, pentru frânare electrică dinamică.

Limitările funcționale ale motorului de tracțiune de c.c. serie provin, în primul rând, din existența colectorului și periilor, care sporesc substanțial gabaritul, greutatea și întreținerea; de

asemenea, viteza periferică a colectorului și t.e.m de reactanță indusă în secția rotorică aflată în comutație constituie factori limitativi ai turației maxime ai motorului (respectiv, ai gradului său de subexcitare) și ai puterii utile disponibile la această turație.

În al doilea rând, motorul de tracțiune de c.c. serie pretinde elemente de conectare electromecanice pentru schimbarea sensului curentului rotoric la trecerea din regimul de tracțiune în cel de frânare electrică.

În al treilea rând, frânarea electrică recuperativă nu este posibilă decât montând un VTC de cadranul II în paralel cu mașina de tracțiune de c.c. serie, aflată în regim de generator.

În al patrulea rând, caracteristica mecanică elastică a motorului de tracțiune de c.c. serie, este defavorabilă în ceea ce privește comportarea la patinare a VEMC, permițând ambalarea roților motoare care s-au desprins.

*Observația 5.1.* Trebuie remarcat că în cazul VEMC, motorul de tracțiune de c.c. serie fiind permanent cuplat mecanic prin angrenaj reductor cu aparatul de rulare, nu poate funcționa în gol și, prin urmare, nu există riscul supraturării și deteriorării sale mecanice.

Condițiile de exploatare și particularitățile funcționale ale motoarelor de tracțiune de c.c. serie au determinat o serie de caracteristici constructive specifice acestor motoare,

a. Motoarele prezintă o construcție modulară, fiind executate în cadrul unor serii unitare, datorită avantajului tipizării constructive și tehnologice. Ele pot fi alimentate atât în c.c. neted, cât și în c.c. ondulat (provenit de la VTC).

b. Fiecare motor este suspendat pe cadrul boghiului (șasiului), fiind dispus longitudinal.

c. Piesele cu rol mecanic, ca scuturile port-lagăre, flanșele statorice, butucul și inelul colectorului sunt uzinate din oțel turnat pentru a rezista solicitărilor din exploatare. Sudarea conexiunilor la colector ale bobinajului rotoric și legăturilor echipotențiale se execută fără aport de metal prin procedeul TIG (cu electrod de tungsten și arc electric în atmosferă neutră de heliu), sporindu-se, astfel, fiabilitatea motoarelor de tracțiune în condiții de suprasarcini mari și repetate.

d. Motoarele sunt protejate contra stingerilor accidentale ale părților rotitoare și ale elementelor aflate sub tensiune, precum și contra pătrunderii corpurilor străine și a apei.

e. Motoarele sunt în construcție autoventilată, aerul de răcire fiind filtrat la intrare în motor și circulat sub acțiunea unui ventilator centrifugal interior.

f. Motoarele se execută în clasele de izolație F și H, rezultând cu dimensiuni axiale și radiale inferioare celor ale motoarelor normale de aceleași puteri și turații.

g. Pentru obținerea unor turații maxime ridicate, se practică slăbirea câmpului magnetic inductor al motoarelor, uzual, prin șuntarea înfășurării de excitație.

h. Circuitul magnetic statoric se execută din tole ștanțate din tablă de oțel. În scopul reducerii dimensiunilor, s-a adoptat forma octogonală a tolei stator, reunind într-o construcție monobloc polii principali și jugul statoric (fig.5.2). Polii principali 1 (uzual, în număr de patru) sunt fără talpă polară, dar cu creștături închise 2, în care se plasează înfășurarea de compensație. Aceasta asigură anihilarea reacției magnetice transversale a indusului în proporție de 80÷95%.

Construcția octogonală a tolei stator permite dimensionarea largă a jugului statornic în zona 3 de așezare a polilor auxiliari și totodată, asigură un spațiu extins pentru înfășurările de excitație și de comutație. De asemenea, ea determină un diametru mărit al indusului favorizând prin aceasta adoptarea unui număr sporit de creștături rotorice ( $Z/2p > 10$ ), respectiv de lamele de colector.

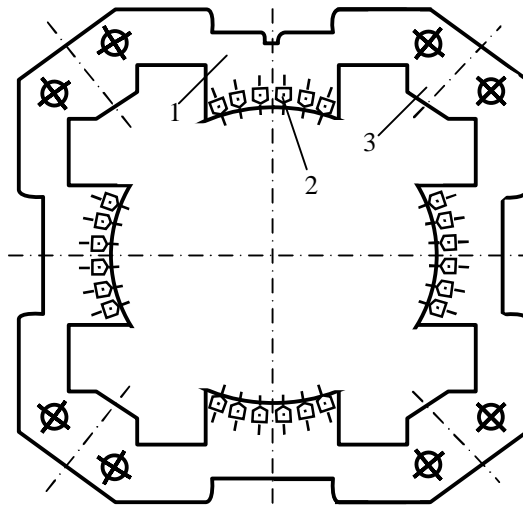


Fig. 5.2. Motoarele de tracțiune de c.c. serie, specifice VEMC.

Tola stator

Împachetarea tolelor atatorice cu flanșe frontale strânse cu buloane (care servesc și la fixarea ulterioară a scuturilor portlagăre) elimină, practic, carcasa motorului.

1. Polii auxiliari sunt confecționați separat, tot din tole și sunt, apoi, fixați după tehnologia clasică. Circuitul lor magnetic este nesaturat, în scopul asigurării unei bune comutații.

### 5.1.2. Funcționarea în regim de tracțiune

Modelul matematic al VEMC, propulsat cu motoare de c.c. serie și aflat în regim de tracțiune, corespunde sistemului nelinier de ecuații diferențiale electromecanice:

$$U_{LC} = R_M i_M + L_M(i_M)(di_M/dt) + K_1(i_M)i_M v \quad (5.1)$$

$$f_t = K_2(i_M)i_M^2 \quad (5.2)$$

$$f_r = a_0 + a_2 v^2 \quad (5.3)$$

$$(dv/dt) = \varphi(f_t - f_r), \quad (5.4)$$

unde  $U_{LC}$  reprezintă tensiunea continuă (nominală) din LC;

$$R_M = R_A + R_B + R_C + R_E,$$

$$L_M(i_M) = L_{A\sigma} + L_{B\sigma} + L_{C\sigma} + L_{E\sigma} + w_E(d\Phi_E/di_M)$$

semnifică rezistența, respectiv inductanța, echivalentă a circuitului serie al motorului de tracțiune, conform schemei electrice din figura 5.3;  $i_M$  este curentul absorbit de motor;  $\Phi_E = k_\Phi(i_M)i_M$  definește fluxul magnetic inductor,  $L_l(i_M) = C_M k_\Phi(i_M) i_t / r_R$ , cu  $C_M$ , constanta motorului de tracțiune de c.c. serie și  $i_t$ , raportul de transmisie al angrenajului reductor dintre motorul de tracțiune și roata motoare de rază exterioară  $r_R$ ;  $v$  este viteza mișcării utile a VEMC;  $K_2(i_M) = K_1(i_M)N_M\eta_t / G$ , cu  $N_M$ , numărul motoarelor electrice de tracțiune din sistemul de propulsie al VEMC,  $\eta_t$ , randamentul transmisiei mecanice a cuplului la roata motoare, iar  $G$  greutatea VEMC (în kN);  $F_t$ ,  $F_r$  sunt forțele specifice (în N/kN) de tracțiune și, respectiv, de rezistență la înaintare corespunzătoare mersului în palier și aliniament al VEMC;  $\varphi = g \cdot 10^{-3} / \xi$ ,  $\xi$  fiind factorul de masă al VEMC. La scrierea ecuației anterioare (5.1) a motorului de tracțiune de c.c. serie, s-a admis că reacția magnetică transversală a indusului este complet compensată și s-au neglijat



influența curenților turbionari și căderea de tensiune la contactul perie-colector.

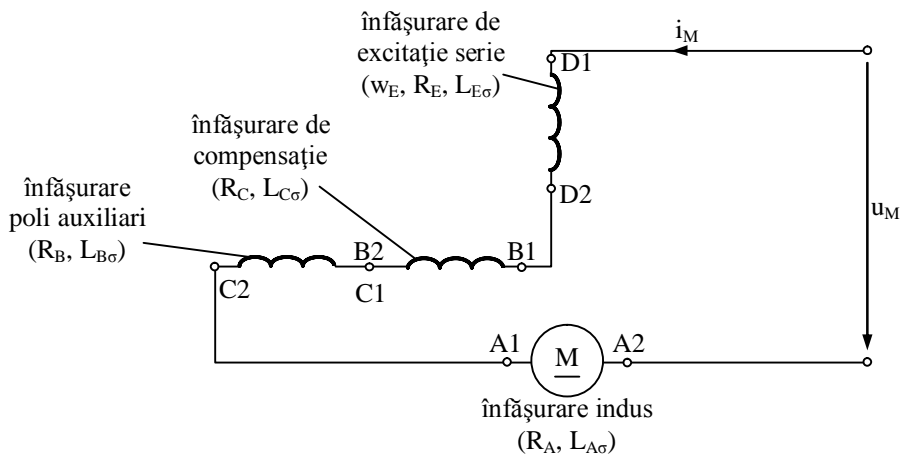


Fig. 5.3 Motorul de tracțiune de c.c. serie. Schema electrică

Condiția de stabilitate a mișcării utile în regim de tracțiune (3.18) este îndeplinită în cazul VEMC propulsat cu motoare de c.c. serie, întrucât din (5.1) ÷ (5.4) rezultă:

$$\begin{aligned} (\partial f_r / \partial v) v_0 &= 2a_2 v^0 > 0 > -2k_1 k_2 U_{LC}^2 (R_m + K_1 v^0)^{-3} = \\ &= (\partial f_r / \partial v) v_0, \end{aligned} \quad (5,5)$$

în ipoteza constanței curentului motoarelor de tracțiune la abateri mici față de regimul de mișcare de bază (cu viteza \$v^0\$) al VEMC.

Regimul de tracțiune al VEMC cuprinde fazele de demaraj și de mers.

*Faza de demaraj a VEMC* corespunde pornirii motoarelor de c.c. serie din sistemul de propulsie și, ca urmare, se poate realiza (a) fie prin înserierea de rezistențe adiționale variabile în circuitul acestor motoare, (b) fie prin modificarea tensiunii lor de alimentare, evident, sub valoarea nominală.

*Pornirea reostatică* a motoarelor de tracțiune de c.c. serie se aplică la VEMC alimentate direct de la LC de c.c. Impunându-

se VEMC o accelerație de demaraj cât mai mare, rezultă din (5.4) că trebuie dezvoltată o forță de tracțiune maximă în perioada de demaraj, ceea ce, conform (5.2), revine la asigurarea în această perioadă a curentului maxim admisibil  $I_{M,max}$ , prin circuitul motoarelor de tracțiune. Pe măsură ce viteza de deplasare utilă a VEMC crește, pentru a menține valoarea curentului  $I_{M,max}$ , trebuie redusă progresiv rezistența adițională (a RPF) din circuitul motoarelor de tracțiune.

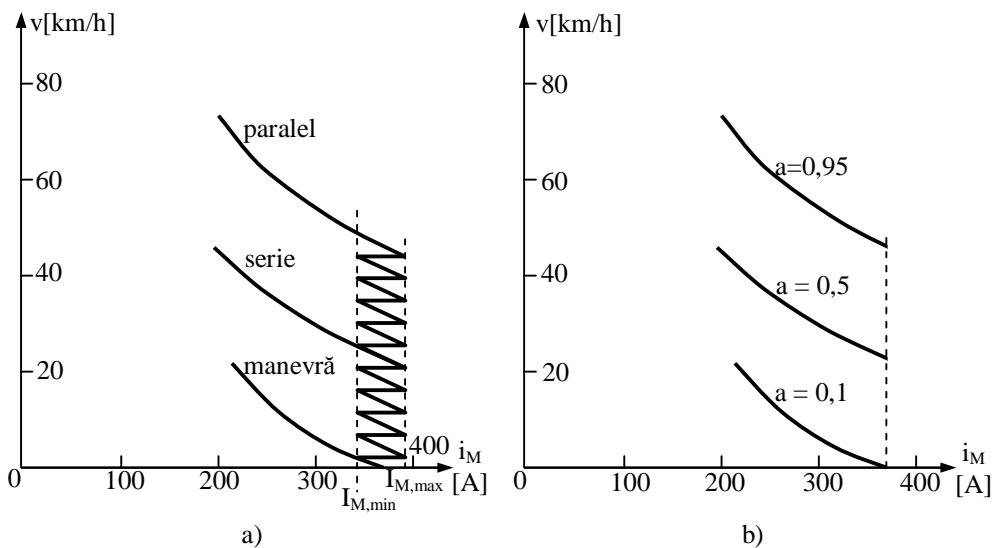


Fig. 5.4. Caracteristicile de demaraj ale unui VEMC propulsat cu motoare de c.c serie și echipat cu RPF (a), respectiv cu VTC (b).

Eliminarea RPF din circuit se face în trepte, cu consecințe, oscilația curentului motoarelor de tracțiune între limitele  $I_{M, min}$  și  $I_{M, max}$  (uzual, se adoptă  $I_{M, min}/I_{M, max} = 0,85 \div 0,9$ ) (fig.5.4, a). Rezultă, corespunzător, variații bruște ale forței de tracțiune la demaraj, care, la rândul lor, produc (conform (5.4)) accelerații suplimentare ale VEMC, cu efecte defavorabile atât asupra sistemului de transmisie, cât și asupra confortului călătorilor.

În general, se urmărește ca: numărul de secții de rezistență și de contacte al RPF să fie redus; contactele, pe cât posibil, să nu se deschidă sub sarcină; solicitarea termică a secțiilor de rezistență să fie cât mai mare. La VEMC (de transport urban) este uzuală soluția RPF din fig. 5.5,a (R1, respectiv R2).

Eliminarea progresivă a treptelor RPF, în perioada de demaraj al VEMC, se face, convențional, cu ajutorul unui controler de forță cu came, comandat manual sau prin servomotor [56].

Valorile treptelor de rezistență ce trebuie scurtcircuitate progresiv la pornirea reostatică a motoarelor de tracțiune de c.c. serie, depind de parametrii electromagnetici ai motoarelor, de tensiunea de alimentare, de numărul motoarelor și schema lor de interconexiune electrică.

*Observația 5.2.* Treptele RPF sunt precedate de un grup de trepte de manevră (uzual, numărul acestora este  $4\div 6$ ), necesare pentru limitarea, în timpul manevrelor, a accelerației inițiale, luată în considerare la demarajul VEMC. Eliminarea treptelor reostatice de manevră pentru atingerea primei trepte normale serie este progresivă și automată (fig. 5.4 a).

Pentru micșorarea consumului de energie electrică în RPF, se recomandă, în perioada de demaraj, trecerea succesivă a motoarelor de tracțiune prin toate interconexiunile electrice posibile: serie, serie-paralel și paralel. Aceste treceri trebuie efectuate: (a) fără întreruperea curentului în circuitul de forță al VEMC, (b) fără să se depășească valoarea-limită admisă  $I_{M, \max}$ , (c) cu variații minime ale forței de tracțiune și (d) cu modificarea fără salt al tensiunii de alimentare a motoarelor (fig. 5.4, a).

# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

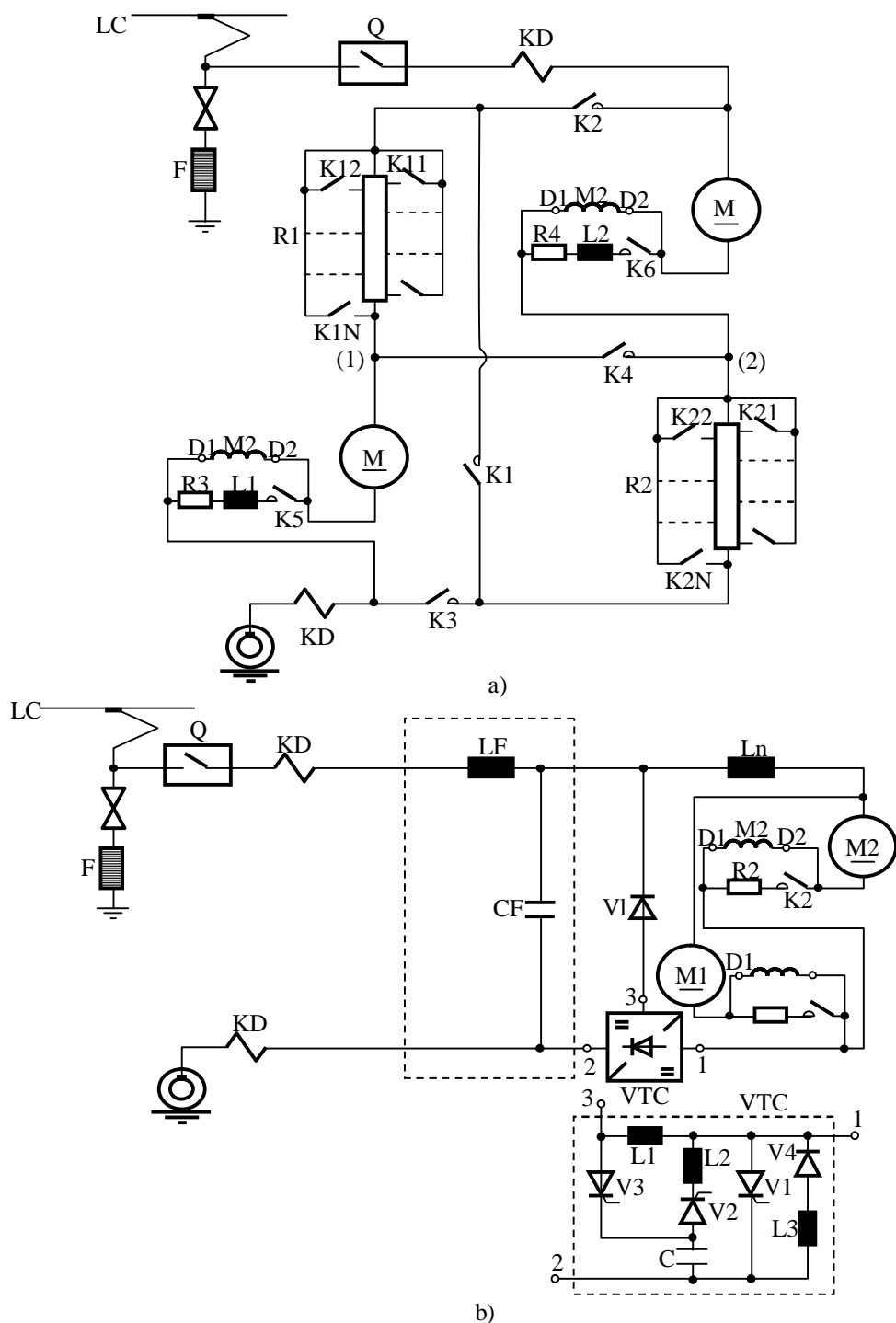


Fig.5.5. Schema de principiu a circuitului de forță al unui VEMC în regim de tracțiune, propulsat cu motoare de c.c. serie și echipat cu RPF (a), respectiv cu VTC (b).

*Exemplul 5.1* În cazul, VEMC din fig 5.5a, cu două motoare de tracțiune M1 și M2, trecerea de la cuplarea în serie a motoarelor la cea în paralel se realizează prin metoda punții, în următoarele etape:

- inițial, cele două motoare de tracțiune M1 și M2 erau cuplate în serie, contactorul K1 fiind închis, iar contactoarele K2, K3 și K4, deschise;
- după ce toate treptele RPF (R1, respectiv R2) au fost scurtcircuitate prin închiderea succesivă a contactelor  $K11 \div K1N$ , respectiv  $K21 \div K2N$ , se poate închide contactorul K4, întrucât nodurile (1) și (2) se află la același potențial electric;
- în etapa întâi de trecere prin punte, se deschid contactorul K1 și contactele  $K11 \div K1N$ ,  $K21 \div K2N$ , iar în etapa a doua se închid contactoarele K2 și K3; în acest fel, fără întreruperea curentului motoarelor de tracțiune, se realizează, prin punte, șuntarea rezistivă a ambelor motoare;
- la o dimensionare adecvată a RPF (R1, respectiv R2), curentul diferențial prin legătura de punte dintre nodurile (1) și (2) este suficient de redus, ca să permită deschiderea contactorului K4 (deci, întreruperea punții), fără șoc de curent, pentru tranziția la cuplarea în paralel a motoarelor.

Metoda de trecere prin punte de la o interconexiune a motoarelor de tracțiune la alta, prezintă avantajul unei forțe de tracțiune cvasi-constante și al unui șoc de curent redus. Neajunsurile ei constau în numeroasele contactoare necesare și în eliminarea asimetrică a treptelor RPF (R1, respectiv R2), pe durata interconexiunii paralel a motoarelor (R1 fiind plasat spre LC, iar R2, spre pământ), ceea ce determină o încărcare diferită a

celor două motoare de tracțiune cu efect defavorabil asupra utilizării aderenței.

Demarajul VEMC se poate efectua și fără RPF, prin modificarea continuă a tensiunii de alimentare a motoarelor de tracțiune de c.c.serie cu ajutorul unui VTC (coborâtor de tensiune) înseriat în circuitul de forță al VEMC (fig. 5.5b și 5.6)

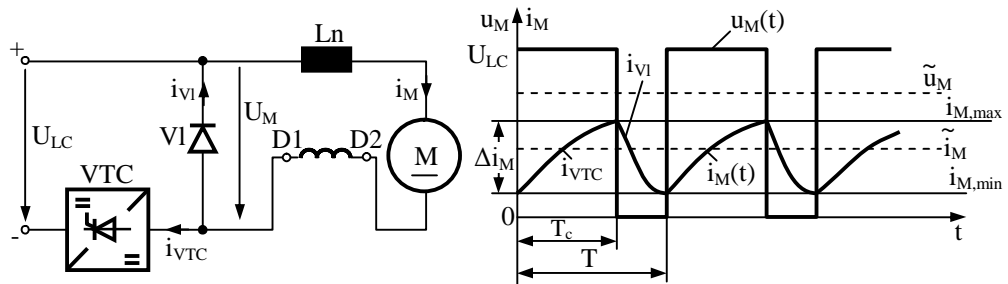


Fig. 5.6 Schema de principiu a unui VTC (coborâtor de tensiune) pentru regimul de tracțiune al VEMC propulsat cu motor de c.c. serie.

Tabelul 5.2 prezintă comparativ câteva aspecte tehnico-economice ale demarajului VEMC cu RPF, respectiv cu VTC.

Tabelul 5.2

Aspecte tehnico-economice	Evaluările comprative ale aspectelor tehnico-economice la <b>VEMC cu VTC/RPF</b>
Consumul energetic la demaraj	65/100
Cheltuielile de întreținere a circuitului de forță la demaraj	75/100
Variația forței de tracțiune la demaraj	Continuă / în salturi
Utilizarea aderenței la demaraj	Completă/ incompletă
Confortul de călătorie la demaraj	Demaraj lin/demaraj cu smucituri
Interferența electromagnetică cu circuitele de semnalizare și de telecomunicații, la demaraj	Potențială/ improbabilă

se observă că, în ansamblu, soluția cu VTC este mai avantajoasă.

Principiul de funcționare al VTC pentru regimul de tracțiune al VEMC este redat în fig.5.6. Considerând dispozitivele de comutație ale VTC ideale, tensiunea aplicată motorului de tracțiune de c.c. serie reprezintă un tren de impulsuri dreptunghiulare și are valoarea medie:

$$\tilde{u}_M = (T_c/T) U_{LC} = a U_{LC} \quad (5.6)$$

$a = T_c/T$  fiind raportul dintre perioada de conducție  $T_c$  și cea de comandă (sau de tact) ale VTC.

În perioada de blocare,  $T - T_c = (1-a)T$  a VTC, atât timp cât motorul de tracțiune este deconectat de la LC curentul său întreținut de inductanța circuitului, va continua să circule autorizat de dioda de regim liber (sau de fugă)  $V_l$ , montată în paralel la bornele motorului.

Se observă din relația (5.6) că, prin variația duratei relative de conducție,  $a = T_c/T$ , a VTC, se poate realiza modificarea continuă a tensiunii de alimentare a motorului de tracțiune de c.c. serie și ca urmare creșterea vitezei de deplasare utilă a VEMC, de la 0 la viteza de regim, în perioada de demaraj a acestuia. Uzual VTC specifice VEMC funcționează la frecvența de comandă,  $F = 1/T$ , constantă, aleasă din gama 200÷450 Hz; astfel că variația lui  $a = T_c/T$  se obține prin modificarea duratei de conducție  $T_c$  a VTC.

*Exemplul 5.2:* Tiristoarele de putere utilizate în realizarea circuitului de forță al VEMC cu VTC pot fi: tiristoare rapide convenționale, tiristoare de conducție inversă (sau tiristoare RTC) și tiristoare cu comandă de blocare pe poartă (sau tiristoare GTO). Primele două tipuri de tiristoare necesită pentru blocare circuite auxiliare de comutație forțată (sau de stingere), de tip oscilant

L-C. Dimpotrivă, tiristoarele GTO se blochează simplu, prin impulsuri negative de curent pe poartă, astfel că circuitul de stingere este eliminat.

În fig. 5.5 b este exemplificată o schemă de VTC cu trei tiristoare rapide convenționale și cu încărcarea condensatorului de stingere sub efectul curentului motor de tracțiune de c.c. serie (schemă pe baza căreia sunt realizate și VTC echipând VEMC românești [27]). Etapele de funcționare ale schemei, corespunzătoare perioadei de tact a VTC, sunt detaliate în figura 5.7.

*Prima etapă de funcționare*, din perioada de conducție a VTC începe cu amorsarea simultană a tiristorului principal V1 și a tiristorului de oscilație V2 (fig.5.7,a). această etapă corespunde funcționării a trei circuite electrice: (a) circuitul diodei de regim liber  $E\ell$ , parcurs de curentul  $i_1$  ce trece și prin motorul de tracțiune; (b) circuitul tiristorului principal V1, parcurs de curentul  $i_2$ , a cărui pantă de creștere este limitată de bobina L1; (c) circuitul oscilant de reîncărcare a condensatorului de stingere C (având polaritatea din figura 5.7, a), parcurs de curentul  $i_3$  a cărui pantă este preluată de bobina de oscilație L2. Prima etapă de funcționare se încheie la momentul  $\Delta t_1$ , la care încetează conducția diodei de regim liber  $V\ell$ , curentul motorului de tracțiune fiind comutat pe tiristorul principal V1. Odată cu procesul de comutație caracteristic primei etape de funcționare, are loc și procesul de inversare a tensiunii la bornele condensatorului de stingere C, în circuitul oscilant C-V2-L2-V1. Acest din urmă proces (având durata unei semialternanțe a curentului  $i_3$ ) îi corespunde, pentru  $\Delta t_1 \leq t < \Delta t_1 + \Delta t_2$ , a doua etapă de funcționare distinctă a VTC (fig5.7,b).



# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

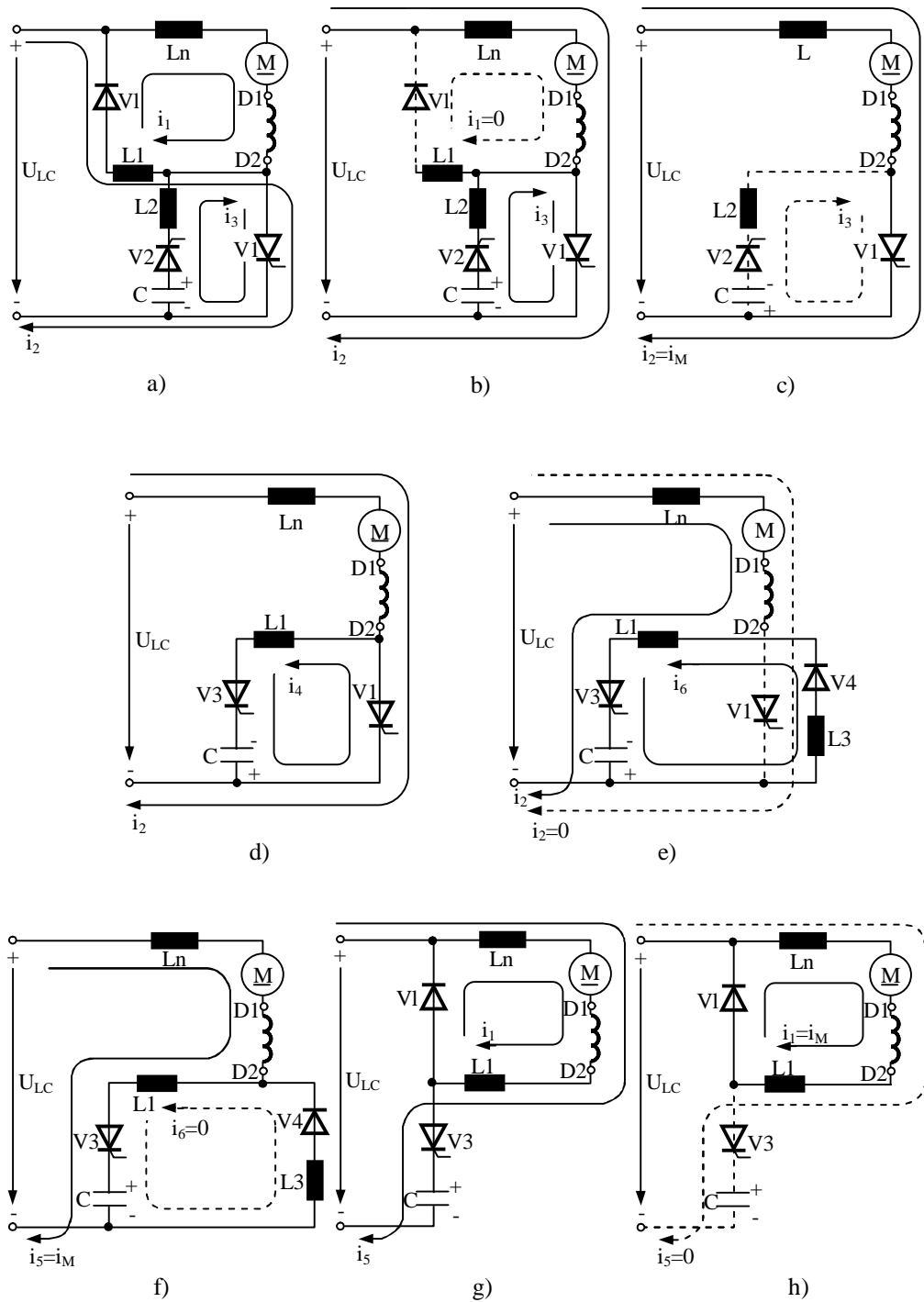


Fig. 5.7. Etapele de funcționare ale VTC (coborător de tensiune)  
din figura 5.5,b

Până la momentul  $v_0 > \Delta t_1 + \Delta t_2$  la care se amorsează tiristorul de stingere V3, are loc *etapa a treia de funcționare*, în care este operat un singur circuit electric, cel serie al motorului de tracțiune și al tiristorului principal V1 (fig.5.7c).

*A patra etapă de funcționare*, pentru  $t_0 \leq t < t_0 + \Delta t_3$ , corespunde comutației forțate a curentului motorului de tracțiune de pe tiristorul principal V1 pe tiristorul de stingere V3 (fig.5.7d). curentul  $i_4$  din circuitul oscilant C-V1-L1-V3, având sens contrar curentului  $i_2$  îl reduce pe acesta până când tiristorul V1 se blochează la momentul  $t_0 + \Delta t_3$ .

Din acest moment începe *a cincea etapă de funcționare*, prin închiderea a două circuite: (a) circuitul serie al motorului de tracțiune, bobinei, L1, tiristorului de stingere V3, și condensatorului de stingere C, parcurs de curentul  $i_5$ ; (b) circuitul auxiliar de reîncărcare al condensatorului de stingere C, conținând latura formată din dioda de accelerare V4 și bobina L3 de limitare a pantei de creștere a curentului  $i_5$  prin acest circuit (fig.5.7e) reîncărcarea condensatorului C, fiind distribuită între cele două circuite, este grăbită, favorizând obținerea unui timp minim de conectare a tiristorului principal V1. Etapa a cincea are durata  $\Delta t_4$  a semialternației curentului  $i_6$ .

*A șasea etapă de funcționare* corespunde reîncărcării în continuare a condensatorului de stingere C sub efectul curentului constant al motorului de tracțiune (fig.5.7f). variația liniară a tensiunii la bornele condensatorului C durează un timp  $\Delta t_5$ , până când această tensiune obține valoarea  $U_{LC}$ .

Urmează *a șaptea etapă de funcționare*, definită prin procesul de comutație a curentului motorului de tracțiune de pe circuitul de stingere L1-V3-C, pe circuitul diodei de regim liber

L1-V $\ell$ -Ln (figura 5.7g). La sfârșitul acestui proces, care are durata  $\Delta t_6$ , tiristorul de stingere V3 se blochează, iar tensiunea la bornele condensatorului C atinge o valoare ușor superioară lui  $U_{LC}$ .

În *etapa a opta de funcționare*, curentul motorului de tracțiune se închide prin circuitul diodei de regim liber, V $\ell$  (fig. 5.7h) în timp ce condensatorul de stingere, C, neavând nici un circuit de descărcare, păstrează surplusul de tensiune față de  $U_{LC}$  (cu care îmbunătățește condițiile de stingere a tiristorului principal V1). Funcționarea continuă a circuitului diodei de regim liber V $\ell$  este limitată de momentul amorșării tiristorului principal V1 când începe un nou ciclu al VTC.

Din analiza etapelor de funcționare din fig. 5.7 se observă că, practic, durata de conducție a VTC (adică, de conectare a motorului de tracțiune la tensiunea  $U_{LC}$ ) din fig. 5.5b este  $T_c = T_c + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 - \Delta t_1$  unde,  $T_c$  definește durata dintre două impulsuri consecutive de comandă pe poarta tiristorului principal V1, respectiv a tiristorului de stingere V3.

Reprezentând ansambluri integrate tiristor-diodă, în conexiune antiparalel, tiristoarele RTC sunt tot mai frecvent utilizate în tracțiunea electrică de c.c., întrucât permit realizarea unor VTC cu durată minima de conducție sub 150  $\mu$ s, și, deci, cu frecvență de comandă constantă în întreg domeniul de viteze al VEMC [13].

În sfârșit, prin utilizarea tiristoarelor GT0 circuitul de comutație forțată fiind eliminat, gabaritul și greutatea echipamentelor VTC se micșorează semnificativ și totodată, viabilitatea acestuia sporește datorită reducerii numărului de componente [13,18].

Corespunzător circuitului electric din fig.5.6 și funcționării VTC cu frecvență de tact constantă, ecuația diferențială (5.1) obține forma:

$$R_M i_M + (L_M(\tilde{i}_M) + L_n) di_M / dt + \tilde{K}'_1 \tilde{v} = \begin{cases} U_{LC}, & \text{pentru } 0 \leq t \leq T_0 \\ 0, & \text{pentru } T_0 \leq t \leq T \end{cases} \quad (5.7, a)$$

unde s-a admis că pe perioada de tact  $T$  a VTC:  $L_M(i_M) \cong L_M(\tilde{i}_M)$ ,  $K_1(i_M)i_M \cong k_i(\tilde{i}_M) = \tilde{K}'_1$  și  $v = \tilde{v} = \text{const.}$  (datorită valorii mari a constantei mecanice de timp a VEMC),  $\tilde{i}_M$  fiind valoarea medie a curentului prin motor,

$$\tilde{i}_M = \frac{1}{T} \int_0^T i_M(t) dt = (aU_{LC} - \tilde{K}'_1 \tilde{v}) / R_M. \quad (5.8)$$

din (5.7) rezultă:

$$i_M(t) = \begin{cases} i_{M, \min} e^{-t/\zeta} + (U_{LC} - \tilde{K}'_1 \tilde{v})(1 - e^{-t/\zeta}) / R_M, & \text{pentru } 0 \leq t \leq T_c \\ i_{M, \max} e^{-(t-T)/\zeta} - \tilde{K}'_1 \tilde{v}(1 - e^{-(t-T)/\zeta}) / R_M, & \text{pentru } T_c \leq t \leq T, \end{cases} \quad (5.9, a)$$

adică un curent pulsator între două limite (fig.5.6),

$$i_{M, \min} = i_M(T) = [U_{LC}(1 - e^{-T/\zeta}) / (1 - e^{-T_c/\zeta})] / R_M \quad (5.10)$$

$$i_{M, \max} = i_M(T_c) = [U_{LC}(1 - e^{-T_c/\zeta}) / (1 - e^{-T/\zeta}) - \tilde{K}'_1 \tilde{v}] / R_M \quad (5.11)$$

Înseriind în circuitul motorului de tracțiune o bobină de netezire de inductanță  $L_m$  (fig.5.6) astfel încât constanta de timp electromagnetică a circuitului  $\zeta = (L_m(\tilde{i}_M) + L_n) / L_M > T > T_c$ , se asigură, pe de-o parte funcționarea în regim de conducție neîntreruptă a motorului adică

$$i_{M, \min} \cong [aU_{MC}(1 + (1-a)T/2\zeta) - \tilde{K}'_1 \tilde{v}] / R_M > 0 \quad (5.12)$$

iar, pe de altă parte, aplatizarea ondulației curentului prin motor

$$\Delta i_M = i_{M, \max} - i_{M, \min} \cong U_{LC} a(1-a)T / (L_M(\tilde{i}_M) + L_n). \quad (5.13)$$

relațiile anterioare (5.12), (5.13) s-au dedus din (5.10) și (5.11) în ipoteza  $T_c/\zeta \ll T/\zeta \ll$ , prin dezvoltare în serie MacLaurin cu

neglijarea infiniților mici de ordin superior celui pătratic.

Conform relației (5.8)  $T_c$  trebuie redus la minim (uzual sub 150 $\mu$ s) în perioada de demaraj a VEMC, pentru ca  $I_M$  să nu depășească valoarea maximă admisă. Dacă tiristoarele din structura VTC nu permit această reducere drastică a duratei  $T_c$ , se recurge la funcționarea VTC cu o frecvență de comandă inițială din domeniul 50 ÷ 120 Hz, care este, apoi, rapid majorată la frecvența nominală (din gama 200÷450 Hz), odată ce viteza VEMC a depășit 5÷10 km/h.

Făcînd o comparație între caracteristicile de demaraj ale unui VEMC cu motoare de tracțiune de c.c. serie și cu RPF (fig.5.4a), respectiv cu VTC (fig.5.4b), se constată o sporire a forței de tracțiune la demaraj în cazul VEMC cu VTC ca rezultat al creșterii curentului mediu de pornire, care nu mai variază între limitele  $I_{M,max}$  și  $I_{M,min}$ . Pe de altă parte, funcționării în interconexiune serie, respectiv paralel, a motoarelor de tracțiune în cazul VEMC cu RPF (fig.5.4a) îi corespunde funcționarea la  $a=0,5$  respectiv  $a=0,95$ , a motoarelor de tracțiune permanent conectate în paralel, în cazul VEMC cu VTC (fig.5.4b); de asemenea, treptele de manevră de la VEMC convențional (fig.5.4a) sunt realizate prin valori ale lui  $a$  ( $= T_c/T$ ) în jurul lui 0,1, la VEMC cu VTC (fig.5.4b).

- *Faza de mers a VEMC* convenționale corespunde funcționării motoarelor de tracțiune de c.c.serie cu schimbarea interconexiunii lor electrice și cu slăbirea fluxului magnetic de excitație. Subexcitarea motoarelor de tracțiune se realizează convențional (la VEMC clasice și chiar la VEMC cu VTC) prin acționarea sau prin șuntarea înfășurării lor inductoare.

În faza de mers a VEMC convenționale, caracteristicile de tracțiune reostatice sunt numai de trecere, întrucât nu asigură o funcționare economică.

La VEMC cu VTC, faza de mers corespunde funcționării motoarelor de tracțiune cu modificarea tensiunii lor de alimentare (prin variația duratei relative de conducție,  $a=T_c/T$ , a VTC) și cu slăbirea preferabil automată, a fluxului magnetic de excitație.

La ambele tipuri de VEMC (clasice, respectiv cu VTC), tensiunea nominală de alimentare (din LC) fiind atinsă la o viteză a VEMC de cca. 30% din viteza maximă, funcționarea în continuare a VEMC în regim de tracțiune corespunde subexcitării motoarelor de c.c. serie (fig.5.1).

Metoda slăbirii fluxului magnetic inductor al motoarelor de tracțiune prin secționarea înfășurărilor de excitație se realizează conform schemei de principiu din fig. 5.8. La funcționarea în câmp inductor plin, conductorul K1 este închis și contractorul K2, deschis, iar în câmpul inductor redus, K1 este deschis și K2 închis. Coeficientul de subexcitare, rezultă, astfel,  $\beta = w_{E1} / w_E$ .

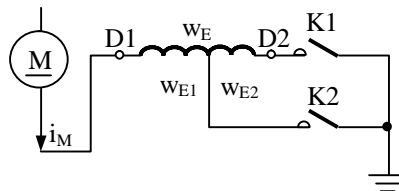


Fig.5.8. Schema de principiu a slăbirii fluxului magnetic inductor al motorului de tracțiune de c.c. serie prin secționarea înfășurării sale de excitație.

Eliminarea celor  $w_{E2} = w_E - w_{E1}$ , spire ale înfășurării de excitație nu se execută prin scurtcircuitarea, întrucât la o variație bruscă a motorului de tracțiune (datorată, îndeosebi, fluctuațiilor rapide ale tensiunii în LC) cele  $w_{E2}$  spire scurtcircuitate s-ar

comporta ca secundarul unui transformator, al cărui curent indus ar agrava comutația motorului.

*Metoda secționării înfășurării de excitație* necesitând scoaterea de prize intermediare pe această înfășurare, complică din punct de vedere constructiv motorul de tracțiune. Aparatajul electromecanic aparent este, însă, simplu, comportând numai contactoare.

*Metoda subexcitării motoarelor de tracțiune* prin șuntarea înfășurării lor inductoare constă în montarea în derivație pe înfășurarea de excitație a unui rezistor ( $R_1$ , respectiv  $R_2$  în fig.5.5b), eventual în serie cu o bobină de reactanță, constituind în ansamblu un așa numit șunt inductiv (grupul  $R_3$ ,  $L_1$ , respectiv  $R_4$ ,  $L_2$ , în fig.5.5a).

Se precizează că de la un anumit grad de subexcitare, șuntarea pur rezistivă a înfășurării inductoare ar conduce la neajunsuri, în funcționarea de regim tranzitoriu a motorului de tracțiune. Astfel la o creștere bruscă a tensiunii la bornele motorului, aceasta ar funcționa tranzitoriu subexcitat, cu comutație agravată, întrucât pe de-o parte curentul prin înfășurarea conductoare ar crește lent, fiind derivat, în mare măsură prin rezistorul de șuntare (din cauza inducției proprii a înfășurării de excitație), iar pe de altă parte, curentul prin circuitul rotoric ar crește rapid. Pentru evitarea acestor efecte negative, se folosește șutul inductiv, care se dimensionează, ținând seama de inducția proprie, a înfășurării de excitație, în regim tranzitoriu. Practic, se utilizează relația :

$$w_{sh} \geq 0,5 w_E p A_E / A_{sh}, \quad (5.14)$$

în care  $w_{sh}$  reprezintă numărul de spire ale șutului inductiv,  $p$ , numărul perechilor de poli de excitație, iar  $A_{sh}$ ,  $A_E$ , secțiunea

miezului de fier al șuntului inductiv, respectiv al polului de excitație.

*Metoda șuntării înfășurării de excitație* a motoarelor de tracțiune necesită aparataj electric mai complicat (rezistoare, bobine, conductoare), dar nu impune modificarea constructivă a motoarelor. Ea se aplică în mod curent la VEMC, realizându-se, practic, 2-3 trepte de câmp magnetic inductor redus (gradul de subexcitare putând depăși 50%) la fiecare interconexiune electrică a motoarelor de tracțiune.

*Metoda slăbirii automate a fluxului magnetic de excitație* al motoarelor de tracțiune se poate aplica numai în cazul VEMC cu VTC corespunzător schemei de principiu din fig.5.9 [14]. Este ușor de observat că deosebirea față de circuitul de forță din fig 5.6. constă în plasarea înfășurării de excitație a motorului de c.c., nu în circuitul serie al acestuia, ci în circuitul diodei de regim liber  $V_l$ , în plus la bornele înfășurării de excitație este conectată în derivație dioda de fugă  $V_c$ , care asigură, în perioada de conducție a VTC un circuit pentru curentul de excitație distinct de circuitul rotoric.

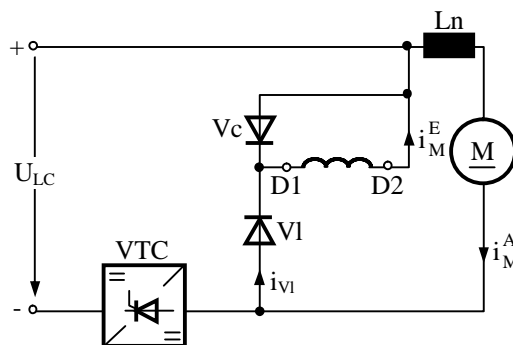


Fig.5.9 Schema de principiu a slăbirii automate a fluxului magnetic de excitație al motoarelor de tracțiune de c.c. serie, în cazul VEMC cu VTC.



Fig. 5.10 prezintă modurile de funcționare de bază ale circuitului electric de forță din fig.5.9, pe durata perioadei de tact a VTC.

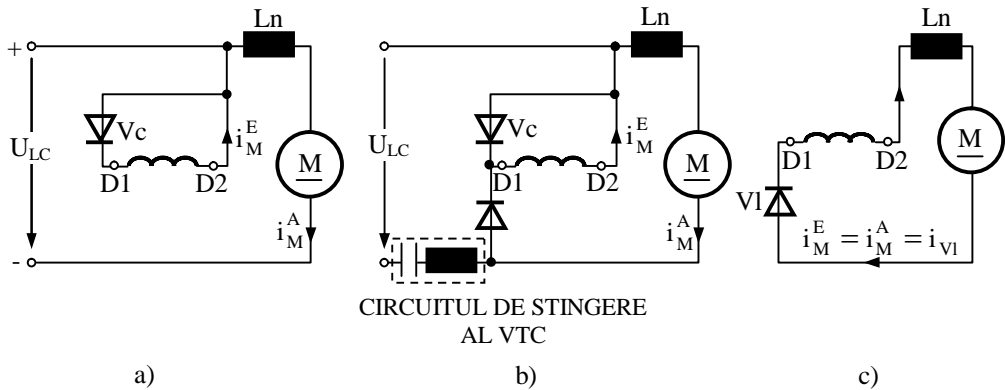


Fig. 5.10 Modurile de funcționare de bază ale circuitului electric de forță din fig.5.9 pe perioada de tact a VTC.

Modul I de funcționare (fig.5.10a) corespunde perioadei de conducție,  $T_c = aT$ , a VTC în cazul în care curentului rotor  $i_M^A$  al motorului de tracțiune crește, iar curentul de excitație  $i_M^E$  scade foarte lent, el închizându-se prin circuitul distinct cu constantă de timp suficient de mare, al diodei de fugă  $V_e$ .

Modul II de funcționare corespunde procesului de comutație al curentului motorului de tracțiune de pe circuitul oscilant de stingere al VTC pe circuitul diodei de regim liber  $V_l$  (fig.5.10b), considerând originea timpului  $T=0$  la începutul acestui al doilea mod de funcționare el există pentru  $0 \leq t \leq t_c$  și se încheie atunci când, fie  $i_M^E(t_c) = i_M^A(t_c)$ , fie  $t_c = T - t_c = (1-a)T$ .

Modul III de funcționare (fig.5.10c) apare numai dacă  $t_c < T - t_c = (1-a)T$ , adică dacă la sfârșitul modului doi de funcționare, curentul de excitație  $i_M^E$  a ajuns la valoarea momentană a curentului rotor,  $i_M^A$ , deci,  $i_M^E(t_c) = i_M^A(t_c)$ . În acest al treilea

mod de funcționare, curenții de excitație ai motorului de tracțiune variază identic în circuitul serie comun al diodei de regim liber  $V_l$ . Durata modului trei de funcționare este evident,  $(1-a)T-t_c$ .

Atunci cînd  $a = T_c / T < 0,8$ , atunci  $t_c < (1-a)T$ , astfel că există toate cele trei moduri de funcționare ale circuitului de forță din fig.5.9. Ca urmare, motorul de tracțiune din fig.5.9, funcționează, pentru  $a < 0,8$ , ca un motor de c.c. serie obișnuit, fără slăbirea fluxului său magnetic de excitație.

Dimpotrivă, dacă  $a = T_c / T > 0,8$  (ceea ce înseamnă că tensiunea medie a motorului de tracțiune tinde spre valoarea nominală a tensiunii din LC), atunci  $t_c = (1-a)T \ll$ , adică  $i_M^E(t_c) < i_M^A(t_c)$  și al treilea mod de funcționare, anterior descris, nu mai apare. Se obține astfel, pentru  $a > 0,8$  o reducere a valorii medii a curentului de excitație în raport cu cea a curentului rotor, deci, o slăbire automată a fluxului magnetic inductor al motorului de tracțiune.

Pentru evitarea dezexcitării totale a motorului de tracțiune, la  $a = T_c / T = 1$  prin electronica de comandă a VTC se impune o valoare minimă nenulă a perioadei de blocare,  $T - T_c = (1-a)T$ , a VTC. Dar aceasta înseamnă o limitare superioară subunitară a lui  $a = T_c / T$ , deci, o restricție de funcționare a motorului la tensiuni medii de alimentare  $\tilde{u}_M = aU_{LC} < U_{LC}$ , restricție ce poate fi, totuși, depășită prin adoptarea convenabilă a tensiunii nominale a motorului de tracțiune în faza de proiectare a acestuia.

Metoda subexcitării automate a motoarelor de tracțiune la VEMC cu VTC prezintă avantajul esențial al modificării simple și continue a caracteristicilor de tracțiune în întregul domeniu de viteze al VEMC, prin intermediul unui singur VTC.

*Observația 5.3.* La introducerea într-un STE de c.c. a VEMC echipate cu VTC trebuie asigurată compatibilitatea electro-magnetică a acestora atât cu circuitul de tracțiune, cât și cu circuitele de semnalizare (în particular, circuitele de cale specifice metrourilor) și de telecomunicații din vecinătate. În aceste circuite, sistemul de propulsie cu VTC al VEMC poate provoca perturbații electromagnetice prin cuplaj conductiv și inductiv sau prin radiație electromagnetică.

Astfel, curentul electric din circuitul de tracțiune conține, pe lângă armonicile (cu frecvențe dominante de  $6 \times 50 = 300$  Hz, respectiv  $12 \times 50 = 600$  Hz) generate de redresoarele de putere (cu 6, respectiv 12 pulsuri) din SSTE de c.c., armonici suplimentare produse prin însăși funcționarea VTC echipând VEMC.

Pentru atenuarea acestor armonici suplimentare de curent, este obligatorie montarea, între VEMC cu VTC și LC de c.c., a unui filtru tampon, compus dintr-o bobină de filtrare (uzual, cu miez de fier)  $L_F$  și un condensator (electrolitic) de filtrare  $C_F$  (fig.5.5b). dacă frecvența de rezonanță a filtrului tampon (presupus ideal) este  $f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{L_F C_F}$ , iar frecvența de lucru a VTC este  $f$ , atunci componenta armonică de frecvență  $nf$  a curentului din circuitul de tracțiune va fi atenuată cu factorul  $(nf/f_0)^2$ .

Condensatorul de filtrare  $C_F$ , pe de o parte, constituie un rezervor de energie electrică în perioadele în care alimentarea motorului de tracțiune este întreruptă (compensând astfel, efectul inductanței LC de limitare a valorii curentului absorbit de motor), iar pe de altă parte, reduce sensibil supratensiunile (de manevră și de comutație) la intrarea VTC[23]. Pentru ca, în timpul funcționării VTC, ondulațiile tensiunii la bornele condensatorului

CF să fie limitate la valori rezonabile și să fie insensibile la variațiile inductanței echivalente  $L_t$  a circuitului de tracțiune cu distanța dintre VEMC cu VTC și SSE de c.c de alimentare ( $L_t$  având, uzual, valori specifice de  $1 \div 2$  mH/km [14] ), se adoptă:

$f_0 = \frac{1}{2} \pi \sqrt{L_F C_F} < f/3$ . Frecvența de lucru  $f$  a VTC fiind practic, în gama  $200 \div 450$  Hz, rezultă pentru  $L_F$  și  $C_F$  valori uzuale în domeniul  $1 \div 10$  mH, respectiv  $1 \div 10$  mF [4,19].

O astfel de dimensionare a comportamentelor filtrului tampon asigură, totodată, o frecvență de rezonanță a circuitului de tracțiune,  $f_0 = \frac{1}{2} \pi \sqrt{(L_F + L_t) C_F} \leq f_0$ , inferioară frecvențelor de semnal din circuitul de tracțiune și eventualele circuite de cale (în cazul metroului ). Astfel, pe de o parte, se evită rezonanțe serie (cu supratensiuni foarte mari) a circuitului de tracțiune, iar pe de altă parte, se obține, pentru frecvențele armonice dominante (de 300 și 600 Hz) generate în LC de redresoarele de putere din SSE, o impedanță de intrare a VEMC cu VTC superioară celei a VEMC convenționale. Trebuie totuși, remarcat că, la 50 Hz, impedanța de intrare a VEMC cu CTV depinde sensibil de valoarea duratei relative de conducție,  $a = T_C/T$ , a VTC (fig.5.11)

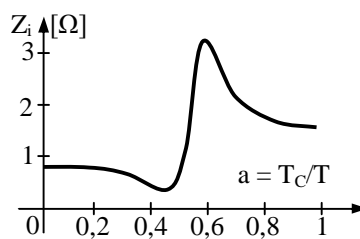


Fig. 5.11. Diagrama impedanței de intrare a unui VEMC cu VTC, la 50 Hz.

Pentru evitarea cuplajului inductiv dintre filtrul tampon și bobina de netezire  $L_n$  din circuitul motoarelor de tracțiune, se

practică dispunerea reciproc ortogonală a bobinelor LF și Ln. VEMC cu VTC pot perturba electromagnetic circuitele de semnalizare (în speță, circuitele de cale din rețeaua metropolitană):

- *prin cuplaj conductiv*, dacă frecvența de lucru a VTC sau armonicile acesteia (respectiv, subarmonicile generate de VTC atunci când funcționează cu frecvențe de tact sub cea nominală, în perioada de demaraj a VEMC) invadează banda de frecvență în care operează echipamentul circuitului de cale; aceste perturbații pot fi evitate prin funcționarea circuitului de cale fie la frecvență industrială (50 Hz), fie la audiofrecvențe de ordinul kHz;

- *prin cuplajul inductiv*, datorită plasării sistemului de propulsie cu VTC dedesubtul VEMC, circuitul de cale aflându-se astfel, sub înălțuirea magnetică a bobinelor (de filtrare, de netezire, de oscilație și de limitare a pantei de creștere a curentului) din circuitul de forță al VEMC și sub acțiunea câmpurilor magnetice de dispersie ale cablurilor de legătură din acest circuit; limitarea zgomotelor electromagnetice, induse în circuitul de cale se realizează prin ecranarea cu tablă de oțel silicios sau de cupru a bobinelor (îndeosebi, al celor de netezire și de oscilație), prin utilizarea carburilor de conexiune ecranate , prin înglobarea în aluminiu sau în oțel a carcasei echipamentului de forță al VTC etc.

În sfârșit, datorită circuitului electric al VTC, în care sunt comutați curenți de sute de amperi în câteva microsecunde VEMC cu VTC pot perturba, prin radiație electromagnetică, circuitele de telecomunicații din vecinătate. Până în prezent nu s-au semnalat perturbații telefonice sau TV ci doar perturbații radiofonice la cca. 200 kHz (mai puțin semnificative, însă, decât cele produse de LC

funcționând în fapt ca o antenă de emisie). Reducerea perturbațiilor radiofonice generate de VEMC cu VTC se obține utilizând un filtru de paraziți radio în serie cu filtrul tampon și bobine toroidale în circuitul de comutație al VTC.

### **5.1.3. Funcționarea în regim de frânare electrică**

Frânarea electrică a VEMC se bazează pe principiul reversibilității energetice a mașinilor electrice de tracțiune. Sunt uzuale trei moduri de frânare electrică a VEMC cu mașinile de tracțiune în regim de generator de c.c. serie: frânarea reostatică (sau dinamică ), frânarea recuperativă și frânarea mixtă, recuperativ-reostatică.

La frânarea electrică, energia cinetică a VEMC este, mai întâi transformată în energie electrică de către mașinile de tracțiune funcționând ca generatoare; această energie electrică este, apoi, disipată sub formă de căldură în rezistoarele instalate pe VEMC, în cazul frânării electrice reostatice, respectiv returnată în LC în cazul frânării electrice recuperative.

Principalele avantaje ale frânării electrice ale VEMC sunt: (a) sporirea siguranței circulației prin dispunerea de un sistem de frânare suplimentară, comod de acționat și de reglat; (b) limitarea utilizării sistemelor de frânare mecanică prin frecare (cu exploatare și întreținere dificile) și ca urmare, reducerea uzurii saboților și bandajelor roților frânate și a prafului metalic produs prin folosirea acestora; (c) independența, în mare măsură, a frânării electrice de condițiile mediului ambiant; (d) imposibilitatea blocării roților frânate electric (întrucât cuplul electromagnetic de frânare este nul, când roata frânată este blocată

); (e) economisirea de energie electrică, în cazul frânării electrice recuperative.

Frânarea electrică a VEMC prezintă și o serie de dezavantaje legate de: (a) dificultatea realizării ei la viteze mici ale VEMC, ceea ce impune folosirea ei în cazul VEMC convenționale, ca frână de menținere pe pante lungi și nu ca frână de oprire; (b) complicarea constructivă a VEMC datorită echipamentului suplimentar necesar; (c) solicitările sporite ale mașinii de tracțiune, puterea ei electrică maximă, la frânarea ca generator de c.c., fiind de 2-3 ori mai mare decât puterea electrică maximă absorbită la sfârșitul perioadei de demaraj VEMC; (d) imposibilitatea frânării recuperative stabile a VEMC convenționale cu mașini de tracțiune funcționând ca generatoare de c.c. serie.

- *Frânarea electrică reostatică (sau dinamică)* cu mașinile de tracțiune în regim de generator de c.c. serie este, practic, generalizată la VEMC. Față de frânarea electrică recuperativă se prezintă avantajului unui grad de siguranță sporit, datorită independenței sale față de LC

Un inconvenient al acestei frânări electrice constă în aceea că datorită constantei electromagnetice de timp relativ mari a circuitului serie al mașinii de tracțiune, la stabilitatea acțiunii de frânare se înregistrează o întârziere semnificativă (care poate fi inacceptabilă atunci când rapiditatea de intervenție este esențială). Pentru înlăturarea acestui neajuns se practică, uzual, preexcitarea la frânare a mașinilor de tracțiune de c.c. serie. (de la o baterie de acumulatori instalate pe VEMC).

Ecuatiile funcționale ale VEMC frânând electrostatic cu mașinile de tracțiune în regim de generator de c.c. serie se pot scrie prin analogie cu sistemul (5.1 ÷ 5.4):

$$E = K' \theta_E(i_f)v = (R_M + R_f) i_f + L_M (i_f) (di_f/dt) \quad (5.15)$$

$$f_f = K'' \theta_E(i_f) i_f \quad (5.16)$$

$$f_f = a_0 + a_2 v^2 \quad (5.17)$$

$$(dv/dt) = -\varphi(f_f + f_r), \quad (5.18)$$

$f_r$  fiind rezistența de frânare, iar  $K'$ ,  $K''$  constante pozitive.

Din ecuațiile de mai sus rezultă că la frânarea electrică reostatică a VEMC condiția (3.19) de stabilitate a mișcării utile, în cazul abaterilor mici față de regimul de mișcare de bază, (cu viteza constantă  $v^0$ ) este îndeplinită, întrucât:

$$[\partial(f_f + f_r)/\partial v]_v^0 = K' K'' \theta_E^2 / (R_M + R_f) + 2a_2 v^0 > 0, \quad (5.19)$$

în ipoteze  $f_f = \text{const.}$

O problemă specifică frânării electrice reostatice a VEMC, o reprezintă asigurarea autoexcitației mașinilor de tracțiune funcționând în regim de generator de c.c. serie. Condițiile necesare de autoexcitație sunt cele cunoscute: existența unui câmp magnetic remanent al polilor de excitație și conectarea corectă a înfășurării inductoare în serie cu înfășurarea indusului, astfel încât curentul de excitație să genereze un câmp magnetic de același sens cu cel remanent. După cum rezultă din fig. 5.12 (în care este rezolvată grafic ecuația (5.15), a procesului de autoexcitație) la cele două condiții anterioare se adaugă, pentru funcționarea stabilă a generatorului de c.c. serie, debitând pe reostatul de frânare  $R_f$ : (a) la o rezistență de frânare  $R_f$  dată, turația mașinii să fie cât mai ridicată, (respectiv viteza  $v$  a VEMC cât mai mare); (b) la o anumită viteză  $v$ , rezistența de frânare  $R_f$  să fie cât mai redusă, ( $R_f < R_{f,cr}$ ), preferabil nulă (frânare dinamică în scurtcircuit).



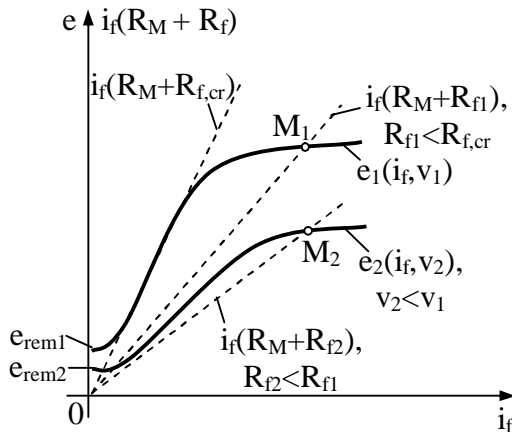


Fig.5.12 Procesul de autoexcitație la generatorul de c.c. serie debitând pe un reostat de frânare.

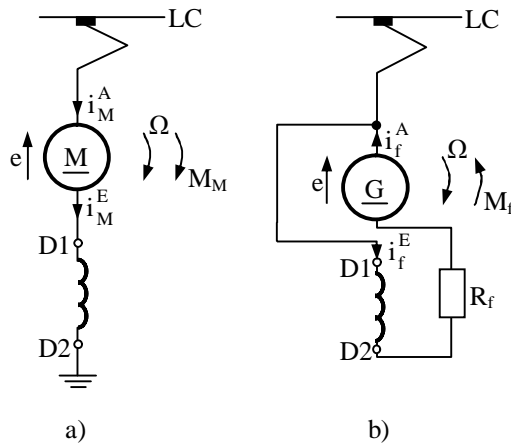


Fig.5.13. Trecerea mașinii de tracțiune de c.c. serie din regim de motor (a), în regim de generator (b), pentru frânarea electrică, reostatică a VEMC.

La VEMC convențional, trecerea mașinii de tracțiune de c.c. serie din regimul de motor în cel de generator pentru frânarea electrică reostatică, impune efectuarea următoarelor operații, (fig.5.13): (1) deconectarea mașinii de tracțiune de la LC; (2) menținerea sensului de rotație al indusului; (3) păstrarea sensului curentului  $i^E$  în înfășurarea inductoare, favorizându-se, astfel magnetismul remanent al mașinii de tracțiune în vederea autoexcitării ei ca generator de c.c. serie.; (4) inversarea sensului

curentului  $i^A$  în înfășurarea indusului (prin schimbarea conexiunilor acesteia la înserierea ei în circuitul electric al mașinii de tracțiune) pentru obținerea unui cuplu electromagnetic de frânare  $M_f$ ; (5) conectarea mașinii de tracțiune pe reostatul de frânare  $R_f$  pe care ea debitează ca generator.

Dacă VEMC circulă în regim de tracțiune, cu viteza maximă, mai întâi se deșuntează regresiv excitația motoarelor de tracțiune până se ajunge la un câmp inductor plin, iar apoi, se trece în regim de frânare electrică reostatică, reducându-se treaptă cu treaptă rezistența reostatului de frânare. Cu cât sunt mai multe trepte de rezistență de frânare, cu atât caracteristicile de frânare  $f_f(v)$  sunt mai numeroase, asigurând dozarea mai fină a forței de frânare, respectiv elasticitatea mai mare în exploatare a VEMC în regim de frânare. Evident, curentul maxim de frânare debitat de mașina de tracțiune ca generator de c.c. serie, forța de aderență și viteza maximă a VEMC impun limită corespunzătoare în planul  $(v-f_f)$  al caracteristicilor de frânare reostatică. Uzual, ca reostat de frânare, se folosește reostatul de pornire, completat cu secții de rezistență suplimentare (RPF). Treptele RPF se determină în mod similar la demaraj, respectiv la frânare, în condiția menținerii unei accelerații, respectiv, decelerații constante.

Dacă în expresia (5.16) se înlocuiește  $i_f$  din ecuația (5.15), scrisă în regim staționar se obține:

$$f_f = K' K'' \theta_e^2 v / (R_M + R_f) \quad (5.20)$$

de unde prin diferențiere:

$$df_f = (2 K' K'' v / (R_M + R_f)) \theta_E d\theta_E + (K' K'' \theta_e^2 / (R_M + R_f)) dv. \quad (5.21)$$

din (5.20) și (5.21) rezultă relația:

$$(df_f/f_f) = 2(d\theta_E/\theta_E) + (dv/v), \quad (5.22)$$

care arată că la VEMC frânând electroreostatic, variația relativă a forței de frânare este superioară variației relative de viteză, adică forța de frânare tinde spre 0 la o valoare nenulă a vitezei VEMC.

Compensarea cel puțin parțială, a scăderii accentuate a forței de frânare reostaică la viteze din ce în ce mai mici ale VEMC se poate realiza prin forțarea corespunzătoare a excitației mașinii de tracțiune. În fig. 5.14 se prezintă principiul frânării reostatice autocompensate într-o gamă largă de variație a vitezei VEMC.

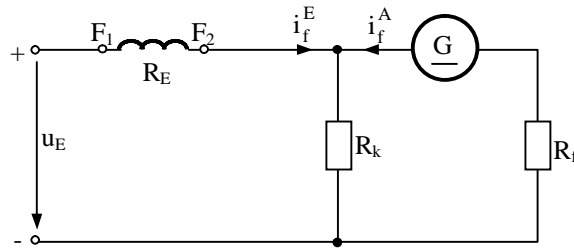


Fig. 5.14. Schema de principiu a frânării electrice reostatice autocompensate a VEMC.

Efectul de compensare este asigurat de rezistența  $R_k$  comună circuitelor inductorului și indusului mașinii de tracțiune și, ca urmare, parcursă de ambii curenți, de excitație  $i_f^E$  și rotoric  $i_f^A$ . Notând cu  $u_E$  tensiunea aplicată curentului de excitație de la o sursă auxiliară de c.c. și presupunând pentru simplitate,  $u_E = \text{const.}$ , rezultă relația:

$$u_E = R_E i_f^E + R_k (i_f^E + i_f^A), \quad (5.23)$$

care se mai poate scrie în forma:

$$(i_f^E / i_{f,\max}^E) + (i_f^A / i_{f,\max}^A) = 1, \quad (5.24)$$

unde,

$$i_{f,\max}^E = u_E / (R_E + R_k) = \text{const.}, \quad i_{f,\max}^A = u_E / R_k = \text{const.},$$

$$i_{f,\max}^E < i_{f,\max}^A$$

Notând  $\alpha = i_{f,\max}^E / i_{f,\max}^A = R_k / (R_E + R_k) = 1 / (1 + R_E / R_k) < 1$ , ecuația anterioară, (5.24) obține forma

$$i_f^E + \alpha i_f^A = i_{f,\max}^E \quad (5.25)$$

care prin diferențiere conduce la:

$$di_f^M = -\alpha di_f^A \quad (5.26)$$

relația (5.26) descrie fenomenul de compensare, în sensul că la viteze reduse ale VEMC frânând electroreostatic, când curentul rotor  $i_f^A$  are tendințe de scădere se produce automat o forțare de excitație, adică o creștere proporțională a curentului  $i_f^E$ .

O schemă de frânare reostaică autocompensată, la care tensiunea circuitului de excitație se modifică în patru etape prin controlerul de bord este aplicată la metroul românesc actual.

*Observația 5.4.* Deoarece majoritatea VEMC sunt echipate cu mai multe mașini de tracțiune, realizarea frânării electrice reostatice devine mai dificilă din cauza instabilității funcționării în paralel a două mașini de tracțiune debitând, ca generatoare de c.c. serie, pe același reostat de frânare.

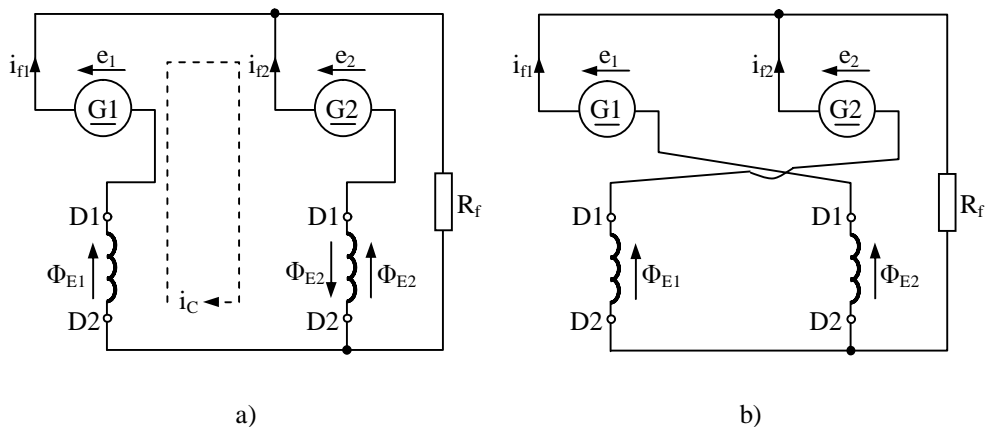


Fig.5.15 Funcționarea în paralel a două mașini de tracțiune a VEMC, debitând, ca generatoare de c.c. serie, pe același reostat de frânare: (a) funcționare instabilă; (b) funcționare stabilizată

Într-adevăr, cu referire la fig.5.15a și considerând de exemplu că datorită toleranțelor de fabricație, câmpul magnetic remanent al generatorului G1 este mai mare decât al generatorului G2 va apare un curent de circulație  $i_c$  prin G2, de sens opus lui  $i_{f2}$ ; curentul  $i_c$  va diminua progresiv fluxul magnetic inductor  $\theta_{E2}$  al lui G2, deci, și t.e.m.  $e_2$ . Acest proces amplificându-se el determină dezamorsarea generatorului G2 urmată de autoexcitarea lui în sens invers, sub efectul curentului debitat de G1 prin circuitul lui G2. cele două generatoare G1 și G2 vor avea t.e.m. înseriate și ca atare, vor funcționa în scurtcircuit unul asupra celuilalt, (fiind ca urmare, parcurse de un curent foarte intens susceptibil a le provoca avarii grave), șuntând, astfel, reostatul de frânare  $R_r$ . Instabilitatea anterioară poate fi evitată prin încrucișarea înfășurărilor de excitație ale celor 2 mașini de tracțiune G1, G2, adică prin înserierea inductorului fiecărei mașini cu indusul celeilalte (fig.5.15b). Într-un asemenea montaj, dacă de exemplu, t.e.m.  $e_1$  a generatorului G1 depășește t.e.m.  $e_2$  a lui G2, curentul  $i_{f1}$  devine, la rândul său, mai mare decât  $i_2$ ; parcurgând, însă, înfășurarea de excitație a lui G2,  $i_{f1}$  va mări fluxul magnetic inductor  $\theta_{E2}$  al lui G2 deci și t.e.m.  $e_2$  ale acestuia. Se reechilibrează, astfel, t.e.m.  $e_1, e_2$  ale celor două generatoare de c.c. serie G1 și G2.

La VEMC cu VTC frânarea electrică reostatică se realizează conform schemei de principiu din fig.5.16 obținută prin modificarea adecvată a schemei VTC pentru regimul de tracțiune al VEMC din fig.5.6. astfel, schema de frânare reostatică VEMC din fig.5.16 nu necesită diodă de fugă, iar VTC (ridicător de tensiune) este conectat în paralel atât cu reostatul de frânare,  $R_f$  cât și cu mașina de tracțiune, funcționând ca generator de c.c. serie.

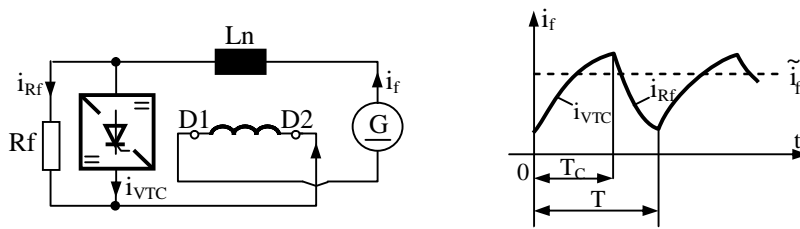


Fig.5.16 Schema de principiu a unui VTC (ridicător de tensiune) pentru regimul de frânare electrică reostatică, al VEMC cu mașina de tracțiune funcțională ca generator de c.c.series.

Pe durata de conducție  $T_c = aT$ , a VTC, mașina de tracțiune frânează dinamic în scurtcircuit. În perioada de blocare,  $T - T_c = (1-a)T$ , a VTC, are loc frânarea reostatică a mașinii de tracțiune în regim de generator de c.c. serie debitând pe reostatul de frânare  $R_f$ . Se observă că VTC permite variația continuă a rezistenței de frânare de la valoarea mixtă, pentru  $a = 0$ , la valoarea 0, pentru  $a = 1$ . Ca urmare, VTC preia rolul controlerului de la VEMC convenționale cu RPF, asigurând reducerea rezistenței reostatului de frânare pe măsură ce viteza VEMC se micșorează.

Uzual, valoarea maximă a rezistenței de frânare, (corespunzătoare întregului reostat de frânare) se determină din condiția ca la viteza maximă a VEMC să se asigure curentul minim de frânare. Această condiție conduce însă la o tensiune maximă la bornele VTC mult superioară tensiunii din LC. Pentru a nu supradimensiona neeconomic tiristoarele din structura VTC se împarte reostatul de frânare în două trepte de rezistență egale  $R_{f1}$  și  $R_{f2}$ , VTC fiind conectat în paralel doar pe una dintre ele, de exemplu  $R_{f1}$  (fig 5.17); se obține astfel o solicitare acceptabilă în tensiune a VTC fără diminuarea cuplului de frânare a mașinii de tracțiune. La rândul ei, treapta de rezistență se înscrie în

circuitul indusului mașinii de tracțiune, fiind scurtcircuitată, prin contactorul K, odată cu reducerea vitezei VEMC.

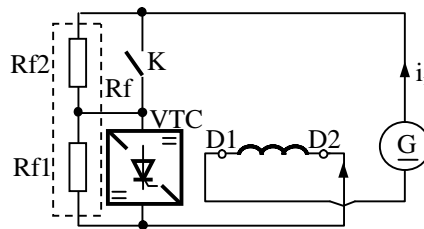


Fig. 5.17 Limitarea supratensiunii la frânarea electrică reostatică a VEMC cu VTC.

La frânarea electrică reostatică a VEMC cu VTC poate fi aplicată de asemenea *slăbirea automată a fluxului magnetic de excitație al mașinii de tracțiune funcționând ca generator de c.c.* Schema de principiu a frânării reostatice în acest caz este prezentată în figura 5.18. se observă că spre deosebire de schema de fânare reostatică din fig. 5.16, înfășurarea inductoare a mașinii de tracțiune este în serie cu VTC și împreună sunt în paralel atât cu circuitul indusului cât și cu reostatul de frânare,  $R_f$ . În plus, înfășurarea inductoare posedă un circuit propriu de regim liber, format din dioda de fugă  $V_c$  și rezistorul  $R_c$ .

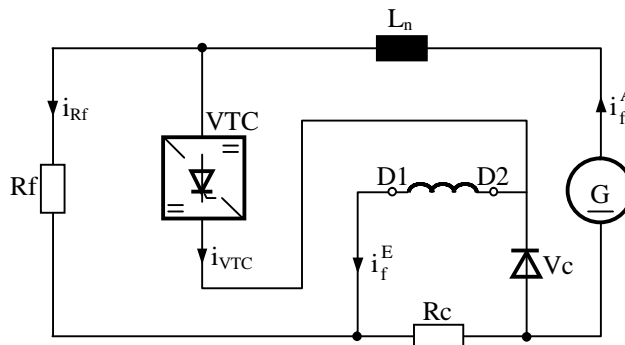


Fig. 5.18. Schema de principiu a frânării electrice reostatice a VEMC cu VTC și cu subexcitarea automată a mașinii de tracțiune de c.c.

La frânarea reostatică în domeniul vitezelor mari ale VEMC, forța de frânare este modificată numai prin subexcitarea automată, cu ajutorul VTC a mașinii de tracțiune aflată în regim de generator de c.c. ;într-adevăr la viteze mari ale VEMC frânând electreostatic, durata de conducție a VTC fiind foarte redusă, curentul de excitație,  $i_f^E = i_f^A - i_{Ff}$ , crește nesemnificativ în circuitul său cu constantă electromagnetică de timp relativ mare. În perioada de blocare a VTC, curentul  $i_f^E$  își menține valoarea redusă parcurgând circuitul său de regim liber, cu constantă mare de timp, format din dioda de fugă  $V_c$  și rezistorul  $R_c$ . În acest timp curentul indusului  $i_f^A$  se scurge integral prin circuitul reostatului de frânare,  $R_f$ . Rezultă, deci, că, în domeniu vitezelor mari de frânare ale VEMC, VTC controlează doar valoarea redusă a curentului de excitație,  $i_f^E$  al mașinii de tracțiune și nu influențează practic fluxul de energie, prin reostatul de frânare  $R_f$ .

Dimpotrivă, la frânarea reostatică, în domeniul vitezelor mici ale VEMC forța de frânare este modificată prin reducerea continuă, cu ajutorul VTC a rezistenței reostatului de frânare  $R_f$ . Într-adevăr, la viteze mici de frânare ale VRMC durata de conducție a VTC crescând, curentul de excitație,  $i_f^E$  are timp să ajungă la valoarea instantanee a curentului indusului  $i_f^A$  în circuitul serie al mașinii de tracțiune, realizându-se, astfel, frânarea dinamică în scurtcircuit a VEMC. Pe durata blocării VTC curentul  $i_f^E$  își menține, practic, valoarea atinsă la sfârșitul perioadei de conducție a VTC întrucât parcurge circuitul, cu constantă mare de timp, format din dioda de fugă  $V_c$  și rezistorul  $R_c$ . În acest timp curentul indusului  $i_f^A$  descrește exponențial în circuitul reostatului de frânare  $R_f$ . Rezultă deci, că în domeniul vitezelor mici de frânare ale VEMC, mașina de tracțiune



funcționează practic, ca un generator de c.c. serie, iar VTC (ridicător de tensiune) îndeplinește rolul de variator (prin creșterea continuă a duratei sale relative de conducție,  $a = T_c/T$ ) a rezistenței reostatului de frânare  $R_f$ .

În sfârșit, domeniul vitezelor de frânare ale VEMC corespunde unei zone de tranziție între cele două moduri de funcționare a schemei din fig. 5.18 descrisă mai sus. Această zonă de tranziție poate fi influențată prin mărimea rezistorului  $R_c$ . În plus, ca rezistor de compundare,  $R_c$  crește stabilitatea frânării reostatice a VEMC cu mașina de tracțiune în regim de generator de c.c.

- *Frânarea electrică recuperativă* presupune funcționarea mașinilor de tracțiune în regim de generator c.c. serie debitând în LC. Dinamica acestei frânări este definită prin sistemul (5.15) ÷ (5.18), cu singura modificare a ecuației (5.15) la forma:

$$e = K' \theta_E (i_f) v = U_{LC} + R_M + i_f + L_M (i_f) (di_f/dt) \quad (5.27)$$

rezultă imediat că la frânarea electrică recuperativă a VEMC condiția (3.19) de stabilitate a mișcării utile, în cazul abaterilor mici față de regimul de bază (cu viteza constantă  $V^0$ ) este îndeplinită, întrucât:

$$[\partial(f_f + f_r)/\partial v]_v^0 = K' K'' \theta_E^2 / R_M + 2a_2 v^0 > 0 \quad (5.28)$$

în ipoteza  $i_f = \text{const.}$

Cu tot interesul ei energetic, frânarea electrică recuperativă este puțin utilizată la VEMC convenționale cu mașini de tracțiune de c.c. serie.

Un prim motiv rezidă în funcționarea static instabilă a mașinii de tracțiune ca generator de c.c. serie debitând în LC. Într-adevăr, în regim staționar, ecuația 5.27 se scrie:

$$e = K' \theta_E (i_f) v = U_{LC} + R_M i_f \quad (5.29)$$

și are soluția corespunzătoare punctelor P și P' din figura 5.19. se observă ușor că funcționarea mașinii de tracțiune nu este posibilă în nici unul din cele două puncte de regim staționar P și P'; astfel în punctul P, nu se asigură stabilitatea statică a frânării recuperative, deoarece în cazul când curentul de frânare  $i_{f,P}$  s-ar reduce cu  $\Delta i_f$ , t.e.m. e ar deveni inferioară tensiunii  $U_{LC} + (i_{f,P} - \Delta i_f)R_M$ , ceea ce ar duce la scăderea în continuare a curentului de frânare până la dezamorsarea mașinii de tracțiune; în cazul creșterii lui  $i_{f,P}$  cu  $\Delta i_f$ ,  $e > U_{LC} + (i_{f,P} + \Delta i_f)R_M$  și, ca urmare, curentul de frânare ar crește în continuare până la valoarea  $i_{f,P}$ , corespunzătoare punctului P', în care deși este asigurată stabilitatea statică a frânării recuperative, mașina de tracțiune nu poate, totuși, funcționa,  $i_{f,P}$ , fiind un curent de frânare exagerat de mare.

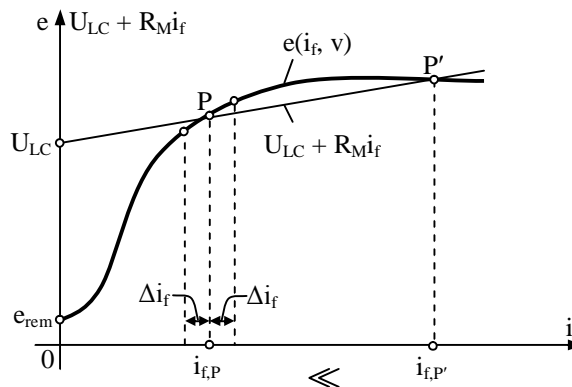


Fig. 5.19. Studiul stabilității statice a frânării electrice recuperative a VEMC cu mașina de tracțiune în regim de motor de c.c. serie.

Un al doilea motiv îl reprezintă imposibilitatea trecerii directe a mașinii de tracțiune de c.c. serie din regim de motor în cel de generator. Într-adevăr această trecere nu se poate efectua

prin simpla mărire a turației motorului de c.c. serie, în scopul obținerii unei t.e.m. e, superioare tensiunii de alimentare  $U_{LC}$ , fiindcă odată cu creșterea turației scade curentul în circuitul serie al motorului, deci și fluxul său magnetic, astfel că inegalitatea  $e < U_{LC}$  se menține.

Un al treilea motiv constă în efectul limitat al recuperării energiei de frânare a VEMC în sistemele actuale de tracțiune electrică urbană. Într-adevăr, LC fiind alimentată, uzual, de la SSTE de c.c. cu redresoare necomandate, recuperarea energiei de frânare a VEMC nu se poate face decât în LC, prin preluarea acestei energii de către VEMC aflate în regim de tracțiune pe același tronson al LC cu VEMC care frânează recuperativ. Este evident că o asemenea recuperare energetică este condiționată de energia cinetică a VEMC disponibilă în momentul frânării, de receptivitatea LC, de profilul căii de circulație, de densitatea traficului etc. Chiar în cele mai favorabile condiții, recuperarea energiei de frânare a VEMC convenționale este modestă, raportul dintre energia electrică recuperată și cea cheltuită de VEMC fiind de cca. 15% . În pofida limitărilor anterioare, se practică, totuși, soluții de utilizare a mașinii de tracțiune ca generator de c.c. la frânarea recuperativă a VEMC. Cea mai economică soluție constă în alimentarea, la frânare, a înfășurării de excitație a mașinii de tracțiune de la o sursă separată de c.c., reprezentată, uzual de un grup motor-generator (M1, motor de c.c.serie –G1, generator de c.c. cu excitație separată, fig.5.20) de tensiune mică și curent mare.

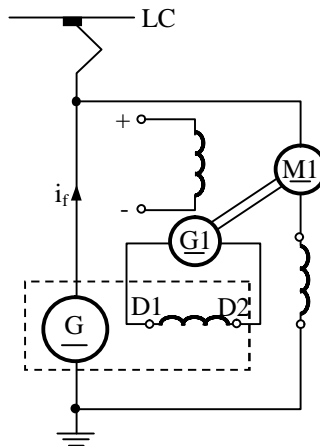


Fig. 5.20 Schema de principiu a frânării electrice recuperative a VEMC cu mașina de tracțiune în regim de generator de c.c. cu excitație alimentată separat de la un grup motor-generator.

Alimentarea separată a excitației mașinii de tracțiune funcționând ca generator de c.c., la frânarea recuperativă a VEMC, prezintă două avantaje esențiale:

- asigură funcționarea static stabilă a mașinii de tracțiune ca generator de c.c. debitând în LC; această concluzie rezultă din analiza figurii 5.21, în care soluția de regim staționar a ecuației (5.29), cu  $\Phi_E \neq f(i_f)$ , este reprezentată de punctul static stabil P;

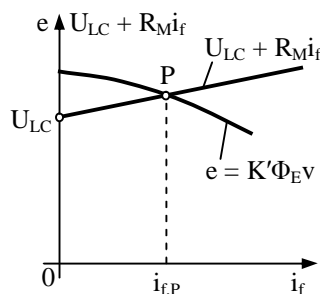


Fig. 5.21. Stabilitatea statică a frânării electrice recuperative a VEMC cu mașina de tracțiune în regim de generator de c.c. cu excitație separată.

- permite variația fină a curentului de excitație al mașinii de tracțiune pentru modificarea caracteristicilor de frânare ale VEMC.

Un dezavantaj al acestei scheme de frânare recuperativă consta în rigiditatea caracteristicilor de frânare, datorită cărora apar variații mari ale curentului și forței de frânare la fluctuațiile tensiunii din LC. Pentru stabilizarea curentului de frânare  $i_f$ , în acest caz, se poate aplica metoda varierii curentului de excitație  $i_E$  în sens invers lui  $i_f$  (valoarea practică a raportului  $i_f/i_E$  fiind menținută între 2 și 3 pentru asigurarea unei bune comutații la mașina de tracțiune).

La VEMC cu VTC frânarea electronică recuperativă se realizează conform schemei de principiu din figura 5.22, în care, spre deosebire de schema frânării reostatice cu VTC din figura 5.16, circuitul reostatului de frânare  $R_f$  este înlocuit prin circuitul format de LC și de dioda de recuperare  $V_r$ .

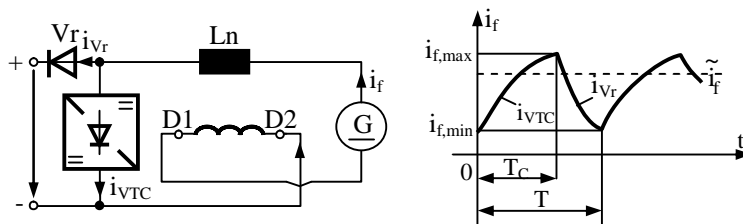


Fig.5.22. Schema de principiu a unui VTC (ridicător de tensiune) pentru regimul de frânare electrică recuperativă al VEMC cu mașina de tracțiune funcționând ca generator de c.c. serie.

În timpul funcționării VEMC, comutarea de la schema cu VTC pentru regimul de tracțiune (fig.5.6) la cea pentru regimul de frânare recuperativă (fig.5.22.) se poate face, fie electromecanic

cu ajutorul unor contactoare, fie electronic, dacă se utilizează un VTC de două cadrane și o logică de trecere adecvată [31].

În perioada de conducție,  $T_c = aT$ , a VTC din figura 5.22, mașina de tracțiune funcționând ca generator de c.c.serie, frânează dinamic în scurtcircuit și totodată, se autoexcită în condițiile cele mai favorabile. Energia cinetică a VEMC este convertită în energie cinetică, iar aceasta, la rândul ei este transformată în energie magnetică și acumulată în bobinele din circuitul serie al mașinii de tracțiune (inclusiv, bobina de netezire  $L_n$ ). Ca urmare, curentul de frânare  $i_f$  crește exponențial în timp în acest circuit, conform ecuației

$$\begin{aligned} e &= K_1(\tilde{i}_f)i_f v = R_M i_f + (L_M(\tilde{i}_f) + L_n) di_f/dt, \\ 0 \leq t \leq T_c &= aT, \end{aligned} \quad (5.30)$$

dedusă din (5.27) în cazul adoptării aceluiași ipoteze și notații ca la scrierea relației (5.7). Ecuația anterioară (5.30) arată că odată cu scăderea vitezei de frânare a VEMC se reduce și t.e.m.  $e$  a mașinii de tracțiune funcționând ca generator de c.c. serie. Pentru a asigura, totuși, acumularea unei energii magnetice suficiente în bobinele circuitului serie al mașinii de tracțiune, trebuie mărită durata de conducție,  $T_c = aT$ , a VTC la scăderea vitezei de frânare a VEMC.

Pe durata  $T_c = aT \leq t \leq T$  a blocării VTC din fig. 5.22, curentul de frânare  $i_f$  (care se menține în circuitul serie al mașinii de tracțiune datorită caracterului inductiv al acestui circuit) este transferat prin dioda de recuperare  $V_r$  spre LC. Acest curent de frânare recuperativ, debitat de mașina de tracțiune scade exponențial în timp conform ecuației:

$$\begin{aligned} e &= K_1(\tilde{i}_f)i_f v = U_{LC} + R_M i_f + (L_M(\tilde{i}_f) + L_n) di_f/dt, T_c = \\ &= aT \leq t \leq T, \end{aligned} \quad (5.31)$$

particularizată din (5.27) cu adoptarea aceluiași ipoteze și notații ca la scrierea relației (5.7). Din ecuația (5.3) rezultă că frânarea recuperativă a VEMC cu VTC din figura 5.22 este posibilă (pe durata blocării VTC) întrucât tensiunea inductivă  $(L_M(\tilde{I}_f) + L_n) \frac{di_f}{dt}$  din membrul drept al ecuației (5.31) fiind negativă, se adaugă la t.e.m. e a mașinii de tracțiune, suma rezultată depășind valoarea tensiunii  $U_{LC}$  și asigurând astfel, circulația unui curent de recuperare prin dioda  $V_r$  spre LC.

Energia acumulată în bobinele circuitului serie al mașinii de tracțiune (în perioada de conducție a VTC) este, așadar, transferată în LC (în perioada de blocare a VTC) ca energie recuperată la frânarea VEMC.

Teoretic, recuperarea energiei de frânare la VEMC cu VTC ar fi posibilă până la oprirea VEMC, când  $T_c$  ar fi egal cu  $T$ , adică  $a=1$ , practic, însă, datorită duratei finite a procesului de comutație al curentului mașinii de tracțiune de pe circuitul oscilant de stingere al VTC, pe circuitul diodei de recuperare  $V_r$ , există o viteză critică redusă a VEMC sub care recuperarea energiei de frânare nu mai este posibilă.

Pentru diminuarea accentuată a vitezei critice a VEMC se practică supradimensionarea condensatorului din circuitul de stingere al VTC .

Din ecuațiile anterioare (5.30 și 5.31) se obține valoarea medie a curentului de frânare debitat de mașina de tracțiune ca generator de c.c. serie:

$$\tilde{I}_f = 1-a U_{LC}/(\tilde{K}'_v - R_M). \quad (5.32)$$

$\tilde{i}_f$  este cu atât mai mare cu cât este mai redusă durata relativă de conducție a VTC. Funcție de  $\tilde{i}_f$ , mașina de tracțiune dezvoltă cuplu electromagnetic de frânare pe fiecare perioadă de tact a VTC.

Analiza accelerației ecuații (5.30) (5.31) conduce la concluzia că prezența termenilor de tensiune inductivă  $(L_M(\tilde{i}_f)+L_n)di_f/dt$ , cu semne opuse în perioada de conducție, respectiv de blocare a VTC, este esențială în procesele de acumulare, respectiv eliberare de energie, specifice fiecărei perioade de tact a VTC. Ori tocmai aceste procese energetice asigură frânarea recuperativă stabilă a VEMC cu VTC și cu mașina de tracțiune ca generator de c.c. serie într-un regim dinamic de ondulații ale curentului de frânare ( $i_{f,min.} \leq i_f \leq i_{f,max}$ ) controlat de VTC.

Condițiile necesare de stabilitate dinamică a frânării recuperative a VEMC cu VTC impun, așadar ca pe durata conducției, respectiv blocării, VTC variația curentului de frânare debitat de mașina de tracțiune ca generator de c.c. serie să fie pozitivă, respectiv negativă. Aceste condiții se pot deduce direct din ecuațiile diferențiale (5.30), respectiv (5.31), rezultând:

$$di_f/dt = (K_1(\tilde{i}_f) - R_M) i_f / L_M(\tilde{i}_f) + L_n > 0, \quad (5.33)$$

de unde

$$R_M < K_1(\tilde{i}_v), \quad (5.34)$$

pentru  $i_{f,min.} \leq i_f \leq i_{f,max}$  și  $0 \leq t \leq T_c = aT$ , respectiv:

$$di_f/dt = (K_1(\tilde{i}_f)i_{fv} - U_{LC} - R_M i_f) / L_M(\tilde{i}_f) + L_n < 0, \quad (5.35)$$

de unde

$$K_1(\tilde{i}_f)i_{fv} < U_{LC} + R_M i_f, \quad (5.36)$$

pentru  $i_{f,min.} \leq i_f \leq i_{f,max}$  și  $T_c = aT \leq t \leq T$ .



Pentru îndeplinirea sigură a condiției (5.34) se practică, uzual preexcitarea la frânare (îndeosebi, la viteze reduse ale VEMC), a mașinii de tracțiune de la o sursă auxiliară de c.c. de mică putere (fig.5.23);

Când curentul mediu  $i_f$  debitat de mașina de tracțiune are valori suficient de mari, căderea de tensiune pe înfășurarea de excitație a mașinii de tracțiune depășește tensiunea sursei auxiliare de preexcitare, determinând decuplarea acestei surse prin blocarea diodei  $Ve$ .

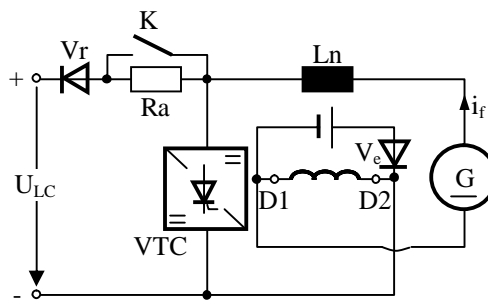


Fig.5.23. Soluții de stabilizare dinamică a frânării electrice recuperative a VEMC cu VTC și cu mașina de tracțiune funcționând ca generator de c.c.series.

Inegalitatea (5.36) nu este, în general, satisfăcută la viteze mari de frânare ale VEMC cu VTC. Pentru stabilizarea dinamică a frânării recuperative la viteze ridicate, există două soluții practice:

(1) înserierea unui rezistor adițional  $R_a$  în circuitul de frânare, de obicei pe partea LC (rezistorul  $R_a$  putând fi scurtcircuitat odată cu reducerea vitezei de frânare a VEMC, fig.5.23);

(2) slăbirea automată a fluxului magnetic de excitație al mașinii de tracțiune conform schemei de principiu din fig.5.24 cu funcționare similară schemei cu VTC din fig.5.18 (rolul reostatului de frânare  $R_f$  fiind, însă reluat de LC ).

Dintre cele două soluții anterioare ultima este, desigur, preferabilă, datorită potențialului ei mărit de recuperare a energiei de frânare a VEMC.

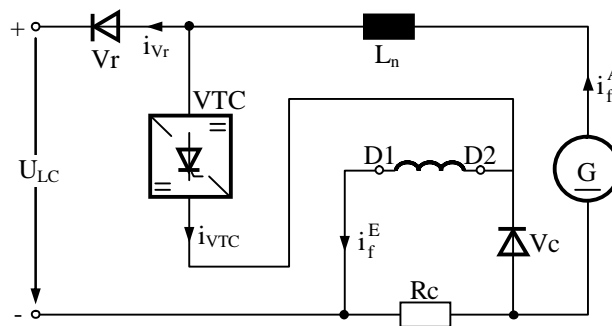


Fig.5.24 Schema de principiu a frânării electrice recuperative a VEMC cu VTC și cu subexcitarea automată a mașinii de tracțiune de c.c.

- *Frânarea mixtă recuperativ-reostatică* se aplică la VEMC cu VTC pentru obținerea unei frânări electrice sigure și în situațiile când LC nu este capabilă să preia energia de recuperare (datorită întreruperii contactului electric dintre captatorul de curent al VEMC și LC, absenței altor VEMC în regim de tracțiune pe același tronson al LC cu VEMC frânând recuperativ etc.)

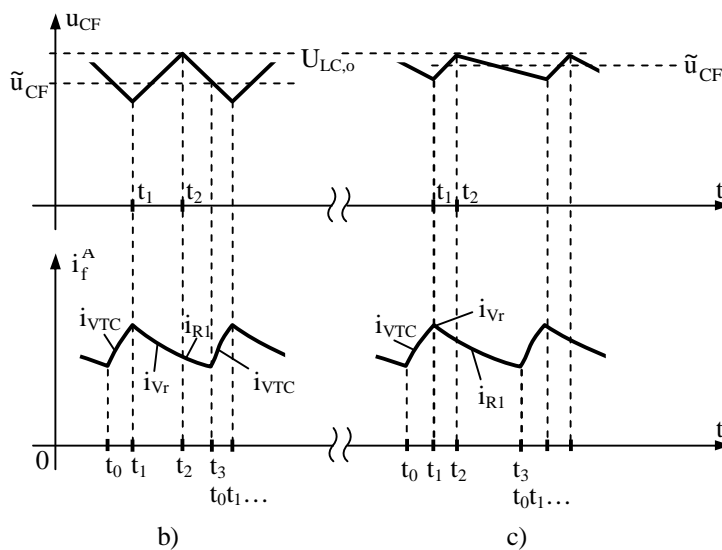
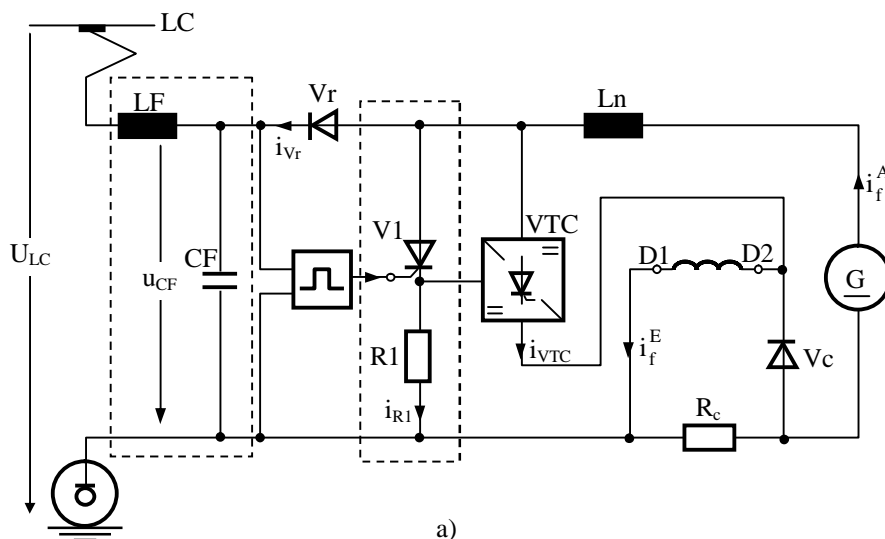


Fig 5.25 Frânarea mixtă recuperativ-reostatică a VEMC cu VTC și cu subexcitarea automată a mașinii de tracțiune de c.c; schema de principiu (a) și funcționarea ei la e tensiune în LC de nivel redus (b), respectiv ridicat (c).

Schema de principiu a frânării mixte recuperativ-reostatice este prezentată în fig 5.25a, ea posedă față de schema de frânare recuperativă a EMC cu VTC din fig.5.24, un dipol electric

suplimentar conectat în paralel cu VTC și constituit din rezistorul de frânare L1 în serie cu tiristorul V1.

Dimensionarea rezistorului de frânare R1 se face astfel încât căderea de tensiune corespunzătoare lui, la curentul de frânare maxim (controlat de VTC), să nu depășească tensiunea de mers în gol  $U_{LC,0}$  din LC.

La rândul său, tiristorul de frânare V1 se cuplează la circuitul de stingere al VTC (figura 5.25a ) astfel încât să poată fi blocat, odată cu tiristorul principal al VTC, la sfârșitul perioadei de conducție a VTC. Pentru amorsarea tiristorului V1 este necesar să se măsoare tensiunea  $u_{CF}$  pe condensatorul filtrului tampon al VEMC întrucât  $u_{CF}$  permite exprimarea receptivității LC. Astfel, dacă  $u_{CF} \geq U_{LC,0}$ , atunci LC se consideră nereceptivă și se amorsează tiristorului V1 pentru frânarea reostatică a VEMC. Așadar, în funcție de valoarea tensiunii  $u_{CF}$  pe fiecare perioadă de tact a VTC, energia de frânare a VEMC se divide într-o parte recuperată în LC și o altă parte disipată în rezistorul de frânare R1.

Pentru funcționarea schemei de frânare mixtă recuperativ-reostatică a VEMC cu CTV din fig 5.25a sunt relevante formele de undă de curenți și tensiuni din fig.5.25b,c. pe durata de conducție ( $t_1-t_0$ ) a VTC curentul  $i_f$  debitat de mașina de tracțiune frânând dinamic în scurtcircuit, crește exponențial în timp. Recuperarea energiei de frânare începe în momentul  $t_1$ , când se blochează tiristorul principal al VTC și tiristorul de frânare V1. durata recuperării ( $t_2-t_1$ ) corespunde încărcării condensatorului de filtrare CF până când  $u_{CF} = U_{LC,0}$ , moment ( $t_2$ ) în care se aprinde tiristorul V1. în continuare, energia de frânare a VEMC este disipată în rezistorul R1 până în momentul  $t_3$ , când intră din nou în condiție VTC preluând curentul din circuitul lui R1.

Tensiunea medie  $\tilde{u}_{CF}$  pe condensatorul de filtrare CF reprezintă o măsură a nivelului de tensiune din LC. Se observă, astfel, că dacă  $\tilde{u}_{CF}$  are valoare redusă, (fig.5.25b) atunci tiristorul V1 se amorsează mai târziu și ca urmare valoarea medie a curentului de recuperare  $i_{Vr}$  (deci, și energia de frânare recuperată) crește, în vreme ce valoarea medie a curentului de frânare reostatică  $i_{R1}$  (deci, și energia de frânare disipată în rezistorul R1 scade). Pentru situația opusă când  $\tilde{u}_{CF}$  are o valoare ridicată (fig.5.25c) se pot face observații echivalente.

### **5.2. VEMC PROPULSATE CU MAȘINI DE TRACȚIUNE ASINCRONE TRIFAZATE**

Mașina asincronă trifazată cu rotor în colivie, utilizată în tracțiune electrică de c.c., prezintă următoarele avantaje comparativ cu mașinile de c.c. cu colector:

- la puteri egale, are dimensiuni, greutate și cost mai reduse;
- la același gabarit, dezvoltă putere și turație mai mari;
- întreținerea este mult mai ușoară
- viabilitatea este mai mare (dată fiind absența colectorului);
- întreaga putere a mașinii este disponibilă până la viteză maximă (fără restricții de tipul gradului de subexcitare);
- frânarea recuperativă este inerentă și nu sunt necesare contactoare pentru trecerea din regimul de tracțiune al VEMC în cel de frânare electrică;
- caracteristica mecanică dură a mașinii de tracțiune permite reprinderea pe CR, fără risc de ambalare, a roților motoare ale VEMC care au pierdut brusc aderența.

## **5.2.1. Invertoare trifazate de putere folosite pentru legarea mașinilor de tracțiune la linia de contact de c.c.**

După cum este cunoscut, singura posibilitate de modificare a vitezei mașinii asincrone trifazate, cu performanțe funcționale și energetice acceptabile este aceea de alimentare prin CSF, care permite modificarea independentă a frecvenței și tensiunii (curentului) la ieșirea lui.

La VEMC echipate cu mașini de tracțiune asincrone trifazate și cu CSF, până la viteza nominală a VEMC, corespunzătoare tensiunii maxime de ieșire a CSF, are loc o funcționare la flux magnetic, constant, condiție care echivalează pentru alimentarea la curent imprimat, cu un regim la cuplu constant, respectiv la forța de tracțiune constantă (fig.5.1). În domeniul de la viteza nominală la cea maximă a VEMC se lucrează în tensiune constantă deci, la flux, magnetic slăbit, ceea ce pentru o valoare constantă, a curentului de alimentare, echivalează cu un regim la putere constantă, implicând reducerea hiperbolică a forței de tracțiune, cu viteza VEMC (fig.5.1.).

Volumul și greutatea mașinii asincrone sunt dictate de forța de tracțiune a VEMC, iar cele ale CSF, de puterea instalată (tensiune maximă pe fază x curentul maxim x numărul de faze), care este întotdeauna superioară puterii mașinilor de tracțiune.

În structura CSF pentru VEMC, se disting convertorul de mașină și convertorul de rețea. Primul este indispensabil și servește la furnizarea energiei electrice, cu parametri variabili, mașinii asincrone de tracțiune, în vreme ce al doilea, dacă există, poate servi la modificarea uneia sau mai multor mărimi energetice

sau la asigurarea unor condiții de funcționare corespunzătoare convertorului de mașină.

Convertorul de mașină este întotdeauna un invertor trifazat de putere cu comutație proprie, servind la formarea din circuitul intermediar de c.c. al CSF a sistemului trifazat cu tensiune și frecvență variabilă, necesar modificării vitezei mașinii asincrone de tracțiune. Invertorul poate fi de tensiune sau de curent, după cum în circuitul său de alimentare se imprimă tensiune continuă, respectiv curent continuu. În primul caz în circuitul intermediar este necesar un condensator, iar în al doilea caz o bobină de inductanță relativ mare.

Invertorul de tensiune poate prelua pe lângă funcția de modificare a frecvenței și pe aceea de modificare a tensiunii, lucrând, în acest caz, pulsant cu frecvența de tact ce nu trebuie să depășească  $300 \div 400$  de Hz., invertorul de curent lucrând cu frecvența fundamentalei tensiuni de ieșire, nu poate realiza decât modificarea frecvenței, cea de modificare a curentului fiind preluată de convertorul de rețea.

Ambele tipuri de invertoare trifazate se pretează fără modificări și la transferul energiei de frânare a VEMC de la mașina de tracțiune (funcționând ca generator) spre LC, în cazul invertorului de tensiune, recuperarea energiei de frânare se face direct inversându-se doar sensul curentului în circuitul de c.c.; în cazul invertorului de curent recuperarea necesită elemente suplimentare, întrucât are loc inversarea tensiunii în circuitul de c.c. nepermisă la LC.

Convertorul de rețea poate lipsi în cazul utilizării invertorului de tensiune cu pulsuri, acesta din urmă putând fi legat

direct la LC de c.c., dar trebuind să fie dimensionat pentru întregul domeniu de variație al tensiunii de alimentare.

La CSP cu inverter de curent, convertorul de rețea este absolut necesar, el fiind de tip VTC, servind la modificarea curentului din circuitul intermediar și fiind dimensionat pentru întreaga putere instalată în inverter.

La baza abordării problemei alegerii și dimensionării inverterului trifazat de putere pentru VEMC cu mașini asincrone de tracțiune pot sta câteva observații (decizia definitivă trebuie luată, însă, în urma calculelor corespunzătoare variantelor pentru care se optează, hotărâtoare fiind, în principal, cerințele de sistem și dispozitivele semiconductoare de putere disponibile):

- inverterul de curent are principiul de funcționare și schemele de comandă și de protecție mai simple, cu posibilitatea utilizării unor tiristoare lente, în comparație cu inverterul de tensiune;

- din punct de vedere al dependenței factorului de utilizare a puterii instalate de frecvența de lucru inverterul de curent este mai avantajos decât cel de tensiune, întrucât lucrează cu frecvența fundamentalei curentului de ieșire nu cu frecvențe de sute de Hz;

- la frecvențe joase de funcționare, specifice regimului de tracțiune al VEMC, inverterul de curent poate genera armonici însemnate, care se reflectă în final, în forța de tracțiune, (impunându-se pulsarea acestui inverter la frecvențe joase), spre deosebire de inverterul de tensiune al cărui conținut de armonici de curent este cu mult mai redus, datorită funcționării cu frecvență de tact relativ ridicată;



- necesarul de blocuri de filtrare la dubla conversiei a CSF cu inverter de curent și VTC este apreciabil mai mare decât la CSF cu inverter de tensiune.

*Inverterul trifazat de tensiune cu condensator de stingere divizat.* Schema de principiu al acestui tip de inverter este redată în figura 5.26.

Inverterul poate funcționa cu o comutație a tiristorului principal în fiecare interval de conducție corespunzător unei alternanțe a tensiunii de ieșire (de frecvență dată) sau cu intervalul de conducție fragmentat corespunzător unei legi de modulație impuse (sinusoidale, trapezoidale etc.).

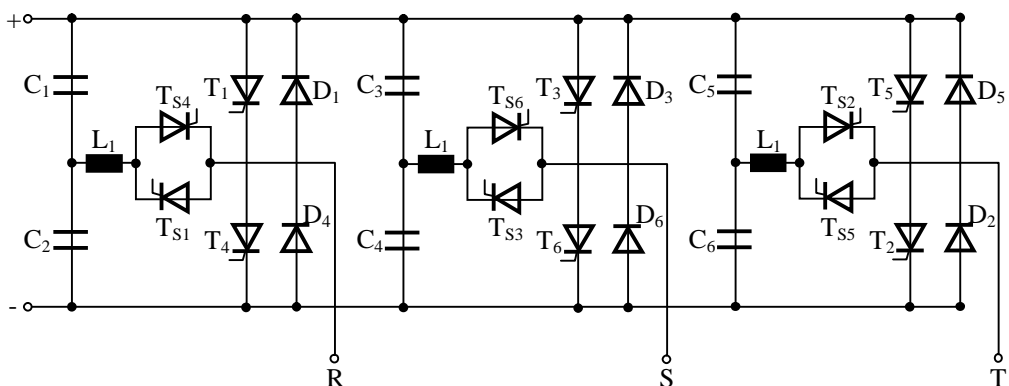


Fig.5.26. Schema de principiu a unui inverter trifazat de tensiune cu condensator de stingere divizat.

Elementele componente ale inverterului sunt: tiristoarele principale  $T_1, \dots, T_6$ , tiristoarele de stingere  $T_{s1}, \dots, T_{s6}$ , condensatoarele de stingere  $C_1, \dots, C_6$ , bobinele de stingere  $L_1, \dots, L_3$ , diodele de recuperare  $D_1, \dots, D_6$ .

Inverterul are asigurată stingerea independentă a tiristoarelor principale, în conducție. Procesul de stingere este declanșat prin comanda de amorsare a tiristorului de stingere,

corespunzător, care închide circuitul de stingere de tip L-C. Circuitul de stingere intervine doar pe durata procesului de comutație în rest fiind separat de circuitele principale, bobinele de stingere nu sunt străbătute de curenții de sarcină, eliminându-se, astfel, pierderile importante din aceste elemente.

Trecerea unui tiristor principal, în stare blocată se realizează prin anularea curentului care-l străbate și aplicarea concomitentă a unei tensiuni de blocare, reprezentând căderea de tensiune în sens direct pe dioda de recuperare. Curentul de sarcină pe timpul comutării este asigurat de circuitul de stingere.

Funcționarea invertorului se poate face în două moduri:

- cu variația tensiunii continue de alimentare și conducție neîntreruptă a tiristoarelor principale, pe durata a  $180^\circ$  electrice;
- cu tensiune continuă de alimentare constantă și modulație în durată a impulsurilor.

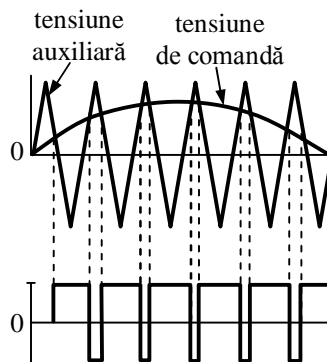


Fig.5.27. Principiul modulației în durată (după o lege sinusoidală) a impulsurilor invertorului.

În figura 5.27. se prezintă al doilea mod de funcționare al invertorului. Impulsurile de comandă de la invertor sunt formate prin compunerea unei tensiuni auxiliare, de obicei triunghiulare, cu tensiunea de comandă sinusoidală.

Frecvența tensiunii de comandă este determinată de viteza VEMC, deci, de turația motorului de tracțiune. La această frecvență se adaugă (sau se scade) frecvența de alunecare, care este dependentă de cuplul motoarelor de tracțiune.

La frecvențe joase (sub 20 Hz ) tensiunea auxiliară nu trebuie sincronizată cu tensiunea de comandă, astfel că poate avea o frecvență stabilă (200÷400 Hz).

Peste frecvența de 20 Hz inverterul poate funcționa cu tensiunea auxiliară de frecvență egală cu un multiplu impar (3,5,7) al frecvenței tensiunii de ieșire. Frecvența tensiunii auxiliare se alege astfel încât să apară cât mai puține armonici superioare în forma de undă a curentului.

*Inverter trifazat de tensiune cu circuit comun de stingere.*  
Un astfel de inverter permite stingerea tiristoarelor sale la momentele dorite, ceea ce face posibilă o reglare a tensiunii de ieșire a inverterului prin împărțirea timpului afectat conducției tiristoarelor, într-o succesiune de conducții urmate de pauze. Raportul dintre timpul de conducție și timpul de pauză, determină mărimea tensiunii de ieșire a inverterului.

Spre deosebire de invertoarele care funcționează pe principiul modulării în durată a impulsurilor (la care fiecărui tiristor principal îi este atașat circuitul său de stingere, comandat sau nu printr-un tiristor auxiliar de stingere) la invertoarele cu circuit comun de stingere puntea trifazată care constituie partea de forță a inverterului, este completată cu un circuit de stingere comun, intercalat între sursa de curent continuu și puntea propriu-zisă.

Schema de principiu a acestui tip de inverter este prezentată în fig.5.28.

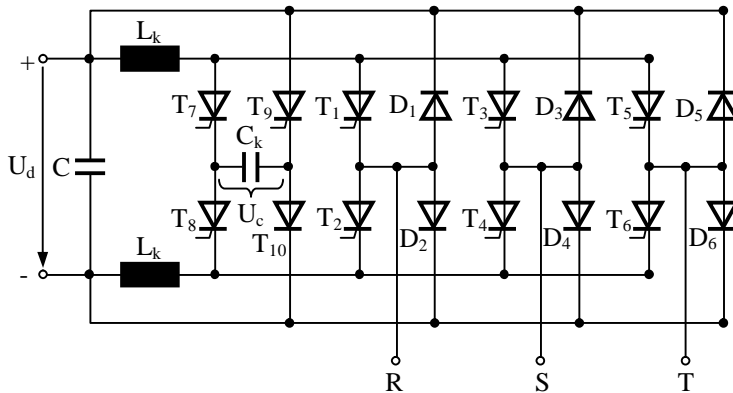


Fig.5.28 Schema de principiu a unui invertor trifazat de tensiune cu circuit comun de stingere.

Circuitul de comutație la acest invertor este format din patru tiristoare  $T_7, T_8, T_9, T_{10}$ , condensatorul de stingere  $C_K$  și două bobine  $L_K$ . diodele de recuperare ale invertorului  $D_1, \dots, D_6$  sunt conectate direct la plusul și minusul sursei de alimentare. Circuitul de stingere operează astfel: se comandă succesiv, două câte două tiristoarele de stingere,  $T_7$  cu  $T_{10}$  și  $T_8$  cu  $T_9$ . deoarece polaritatea condensatorului se inversează după fiecare proces de stingere, ramurile superioare și inferioare ale invertorului vor fi stinse în mod alternativ.

Încărcarea și descărcarea condensatorului de stingere se face de la plusul sursei, prin bobina de comutație  $L_K$  și tiristoarele auxiliare, la minimum sursei.

Ecuatiile tensiunii și curentului condensatorului la un moment oarecare de timp  $T$ , sunt de forma:

$$U_c = U_d - (U_d - U_{c0}) \cos \omega t + \omega L_K I_0 \sin \omega t, \quad (5.37)$$

$$i_c = \omega C (U_d - U_{c0}) \sin \omega t + I_0 \cos \omega t \quad (5.38)$$

unde:  $U_d$  este tensiunea sursei,  $U_{c0}$ , tensiunea cu care a fost încărcat inițial condensatorul în secvența anterioară,  $I_0$ , curentul

inițial care parcurge inductanța  $L_K$ , iar  $\omega$  pulsația curentului oscilant serie,

$$\omega = 1/\sqrt{L_K C_K} . \quad (5.39)$$

încărcarea completă are loc după timpul:

$$t = \pi \sqrt{L_K C_K} . \quad (5.40)$$

La fiecare comutare, tensiunea pe condensator își schimbă polaritatea de la  $+2 U_d$  la  $-2 U_d$ , iar curentul de vârf prin condensatorul de stingere este de:

$$i_{c,max} = 2U_d \sqrt{C_K / L_K} \quad (5.41)$$

Conducția fiecărui tiristor al punții este de  $180^\circ$ , tiristoarele în conducție trebuie să se stingă în timpul cât tensiunea la bornele porții inverterului se inversează, datorită comandării circuitului de stingere. Acest timp trebuie să fie mai mare decât timpul de revenire  $t_q$  al tiristoarelor, adică:

$$(\pi \sqrt{L_K C_K} / 2) > t_q . \quad (5.42)$$

În momentul blocării tiristoarelor, curentul reactiv al sarcinii (motorul asincron de tracțiune) va circula prin diodele de recuperare.

*Inverter trifazat de curent cu stingere autonomă.* În cazul acestui tip de inverter, energia este înmagazinată, în bobina circuitului de c.c. Sarcina (motorul asincron de tracțiune) face parte din circuitul de comutație, inverterul putând fi considerat ca o sursă de c.a. cu frecvența și amplitudinea variabile.

Acest tip de inverter este lipsit de tiristoarele auxiliare de stingere, având, astfel, o comandă mai simplă. Schema de principiu a inverterului trifazat de curent cu stingere autonomă este redată în fig.5.29.

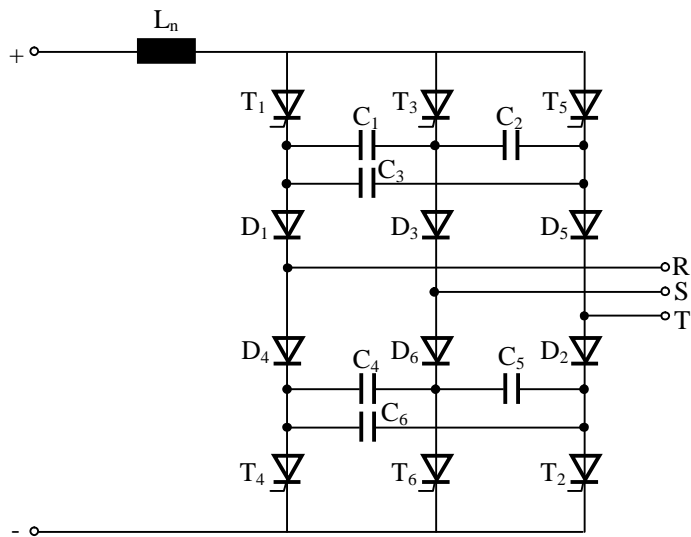


Fig.5.29. Invertorul trifazat de curent cu stingere autonomă.  
Schema de principiu

Elementele componente ale invertorului sunt șase tiristoare  $T_1, \dots, T_6$ , șase diode  $D_1, \dots, D_6$ , care realizează decuplarea celor șase condensatoare de stingere  $C_1, \dots, C_6$  de înfășurările motorului asincron de tracțiune. Condensatoarele de stingere sunt conectate între faze, punctele de legătură cu fazele fiind între diode și tiristoare.

Stingerea tiristoarelor invertorului este asigurată prin aprinderea după  $120^\circ$  electrice a tiristorului care urmează a prelua conducția. Tiristoarele principale, nu este necesar să fie rapide. Condensatoarele de stingere, conectate între faze se vor încărca datorită trecerii prin ele a curentului motorului de tracțiune.

Caracteristic comutației este că tensiunea pe condensatoarele de stingere își schimbă polaritatea, iar energia înmagazinată în inductanța de scăpări a motorului., în absența

diodelor de recuperare, va determina supraîncărcarea condensatoarelor de stingere, care trebuie să preia această energie.

Comutarea curentului dintr-o fază în alta se face printr-un proces oscilant determinat de circuitul format din condensatoarele de stingere și inductanțele mașinii de tracțiune. Frecvența proprie a acestui circuit este:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L'C}}, L' = L_1 + \frac{L_m L_2}{L_m + L_2}, \quad (5.43)$$

unde  $L_1$  este inducția statornică,  $L_m$ , cea de magnetizare, iar  $L_2$  cea rotorică.

Tensiunea maximă la care se încarcă condensatorul de stingere este dată de relația:

$$u_{c,max} = u \sin\varphi / (2I_d) + I_d \sqrt{4L'/3C}. \quad (5.44)$$

unde  $u$  este tensiunea pe fază a motorului, iar  $I_d$  curentul din circuitul de c.c. Din relația (5.44) rezultă că tensiunea maximă la care se încarcă condensatorul de stingere de c.c, depinde de inductanțele de dispersie ale motorului și de caracterul sarcinii (prin  $\sin\varphi$ ).

Valoarea timpului de blocare rezultă:

$$t_b = (3Cu \sin\varphi / 2I_d) + \sqrt{3L'C}. \quad (5.45)$$

Motorul asincron de tracțiune cu rotorul în colivie, alimentat de la un astfel de inverter de curent, produce cupluri oscilante (sau pendulare) cu efecte nedorite îndeosebi la frecvențele joase. La alimentarea motorului cu blocuri (dreptunghiulare) de curent de câte  $120^\circ$  el., apar alături de fundamentală  $f_1$  și armonici cu frecvențele  $f_1(6k \pm 1)$ , unde  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Aceste armonici produc cupluri oscilante cu frecvența  $6f_1k$ , dintre care cel mai nedorit este cuplul cu frecvența  $6f_1$ , întrucât poate provoca rezonanțe

mecanice în complexul motor de tracțiune-transmisie-boghiu-carcasa VEMC.

Cuplurile oscilante se pot elimina sau diminua printr-o fragmentare a blocului de curent de durată  $T/3$ . pentru funcționarea motorului asincron cu curenți simetrici, trebuie, însă, respectate câteva condiții:

- Aria curent-timp a blocului de curent de durată  $T/3$  trebuie să rămână neschimbată;
- Blocul de curent va fi împărțit într-un număr impar de fragmente dreptunghiulare;
- Fiecare pauză în unda de curent va fi egală întotdeauna cu durata unui impuls de curent în domeniul  $0 \leq \omega t \leq T/3$ ;
- Extragerea unei arii curent-timp este posibilă numai în domeniul  $\pi/6 \leq \omega t \leq \pi/3$ , lățimea minimă a pulsului de curent din mijloc fiind  $\pi/3$ .

În fig. 5.30. sunt prezentate cazurile în care din blocurile de curent de durată  $T/3$  sunt extrase două sau patru impulsuri de curent.

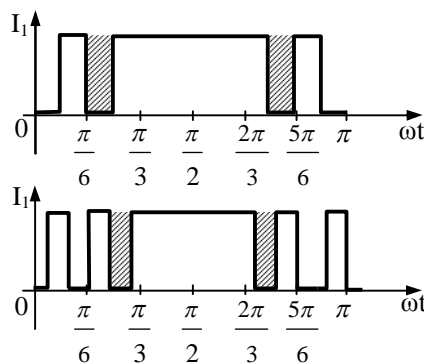


Fig.5.30 Extragerea din blocul de curent de durată  $T/3$  a două, respectiv patru pulsuri de curent.



Analog modulației în durată a impulsurilor invertoare de tensiune, se face și fragmentarea blocului de curent, problema trecerii de la un domeniu la altul (cu un număr diferit de pulsuri) având drept criteriu de bază timpul de comutare; trecerea de la un număr mare de pulsuri la un număr mai mic, are loc atunci când lățimea primului puls devine ordinul de mărime al unghiului de comutare.

Cuplurile oscilante cu frecvența de șase ori frecvența fundamentalei sunt alimentate încă de la funcționarea cu trei pulsuri a inverterului.

### **5.2.2. Funcționarea în regimurile de tracțiune și de frânare electrică**

În traficul urban, majoritatea VEMC operaționale, cu mașini asincrone de tracțiune sunt echipate cu CSF de tip VTC - inverter trifazat de curent [7,34,62].

Unele firme constructoare de echipamente de tracțiune electrică (Strömberg, Hitachi, Toshiba) au realizat și introdus în exploatarea curentă VEMC cu ansamblu inverter de tensiune pulsant (în tehnologie GTO) – mașină asincronă de tracțiune, dar complexitatea electronicii de reglare și de protecție, precum și problemele de compatibilitate electromagnetică au limitat, deocamdată extinderea acestor tipuri de VEMC.

În cele ce urmează, se consideră numai VEMC cu sistem de propulsie VTC inverter trifazat de curent cu stingere autonomă – mașină de tracțiune asincronă cu rotor în colivie. (5.31).

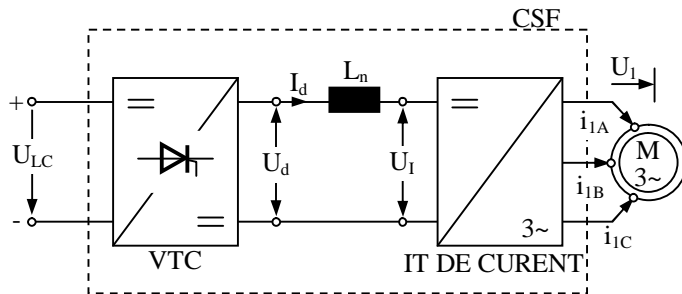


Fig.5.31. Schema de principiu a sistemului de propulsie VTC - invertor de curent - mașină asincronă de tracțiune pentru VMC.

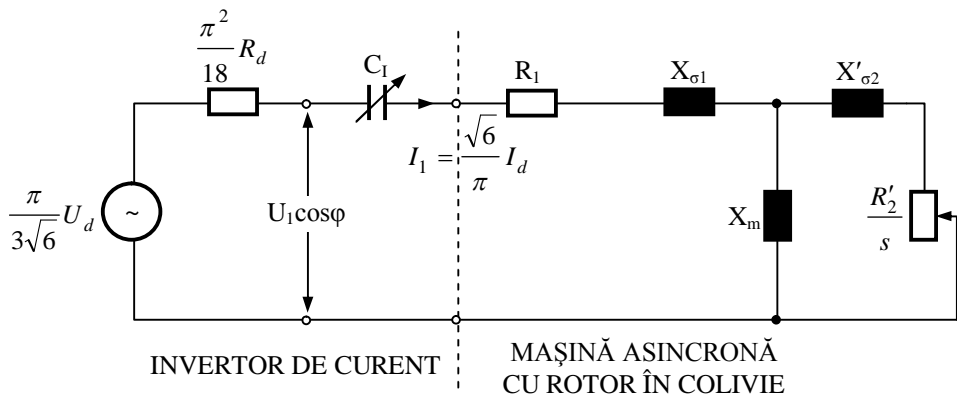


Fig.5.32. Schema electrică echivalentă fazăică de regim permanent, (pentru armonica fundamentală a curentului imprimat) corespunzătoare ansamblului invertor trifazat de curent cu stingere autonoma-mașină de tracțiune asincronă cu rotor în colivie.

Analiza performanțelor de regim permanent ale unui astfel sistem de propulsie poate fi efectuată în baza schemei electrice echivalente fazice, pentru armonica fundamentală a curentului imprimat, din fig.5.32. La stabilirea acestei scheme echivalente simplificate s-a considerat că alimentarea de la invertor a satorului mașinii asincrone, se realizează cu curent imprimat, în

blocurile triunghiulare de câte  $120^\circ$  electric, și s-a reținut doar armonica fundamentală  $I_1$  din dezvoltarea în serie Fourier a acestui curent.

Ca atare s-a putut scrie relația:

$$I_1 = (\sqrt{6}/\pi) I_d, \quad (5.46)$$

unde  $I_d$  reprezintă curentul din circuitul intermediar de c.c. al CSF (fig. 5.31)

Între amplitudinea semnalului de la intrarea c.c. a inverterului și valoarea efectivă  $U_1$  a tensiunii cvasi-sinusoidale de la ieșirea lui de c.a. nu există o relație directă întrucât la funcționarea ansamblului inverter de curent cu stingere autonomă, mașină asincronă, totdeauna circuitul unei faze statorice este deschis. Totuși, s-a putut scrie ecuația de bilanț al puterilor active, de la intrarea, respectiv ieșirea, inverterului, sub forma:

$$U_1 I_d = 3 U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (5.47)$$

Unde,  $\cos \varphi$  definește factorul de putere al mașinii asincrone. Din 5.46 și 5.47 s-a obținut relația de tensiune:

$$U_1 = (3\sqrt{6}/\pi) U_1 \cos \varphi \quad (5.48)$$

Ecuațiilor anterioare (5.46), (5.48) li s-a asociat schema electrică echivalentă fazică de regim permanent din fig.5.32. Aceasta a încorporat în reprezentarea inverterului de curent (cu stingere autonomă), un condensator variabil  $C_I$ , prin care s-a ținut seama de transferul puterii reactive, de la o fază statorică la alta, prin mecanismul comutației acestui convertor. Condensatorul  $C_I$  trebuie considerat, așadar ca un element serie de circuit ce se ajustează, intrinsec și continuu, astfel încât să anuleze partea reactivă a impedanței echivalente a mașinii asincrone.

În fapt, invertorul de curent (cu stingere autonomă), este modelat în fig. 5.32, ca un convertor de c.c. – c.a. cu raport de transformare în tensiune de  $\pi/3\sqrt{6}$  și în curent de  $\sqrt{6}/\pi$ , și ca o sursă de putere reactivă, care în orice moment satisface exact necesarul de putere reactivă al mașinii asincrone.

În circuitul electric din fig. 5.32 s-a utilizat pentru prezentarea mașinii asincrone, schema echivalentă fazică simplificată (prin neglijarea pierderilor în fier ale mașinii) corespunzătoare armonicii fundamentale a curentului statoric imprimat, de valoare efectivă,  $I_1$  ( $R_1$ ,  $X_{\sigma 1}$  și  $R'_2$ ,  $X'_{\sigma 2}$  fiind rezistența și reactanța de dispersie ale statorului, respectiv ale rotorului raportat la stator,  $x_m$  reactanța de magnetizare raportată la stator, iar  $s$ , alunecarea mașinii ). De asemenea s-au inclus rezistența ( $\pi^2 / 18$ )  $R_d$  echivalentă, pe partea de c.a., rezistenței  $R_d$  a circuitului intermediar de c.c. al CSF (conform ecuației de bilanț energetic (5.47)) și sursa de c.a. a cărei tensiune efectivă de fază echivalează tensiunea  $U_d$  a circuitului intermediar.

- Corespunzător regimului de tracțiune al VEMC pe caracteristica mecanică (de regim permanent ) a mașinii asincrone de tracțiune, funcționând la curent imprimat de la CSF, se disting două zone de lucru: (a) una de cuplu constant respectiv de flux magnetic al mașinii, constant, pentru frecvențe statorice,  $f_1$  subnominale; (b) cealaltă de putere constantă, respectiv de flux magnetic slăbit pentru frecvențe  $f_1$  supranominale; uzual domeniul de frecvență pe care este extinsă prima zonă de lucru reprezintă doar jumătatea celui al zonei a doua. Expresia analitică a acestei caracteristici mecanice se poate obține în baza schemei electrice echivalente din fig.5.32 și a relației cunoscute de definire a cuplului electromagnetic de regim permanent al mașinii asincrone:

$$M_e = (3p/\omega_1) (R'_2/s) I_2'^2, \quad (5.49)$$

$I_2'$  fiind valoarea efectivă a curentului rotorului raportat la stator (armonica fundamentală), iar  $\omega_1 (=2\pi f_1)$ , pulsația de alimentare a statorului. Într-adevăr dacă în expresia generală 5.49 se înlocuiește curentul rotorului  $I_2'$  prin

$$I_2' = |jX_m / [(R'_2/s) + j(X_m + X_{\omega 2})]| I_1, \quad (5.50)$$

conform schemei echivalente din fig.5.32 se obține:

$$M_e(I_1, \omega_2) = 3p R'_2 L_m^2 I_1^2 \omega_2 / (R'^2_2 + \omega_2^2 L'^2_2), \quad (5.51)$$

unde s-au introdus noțiunile:

$\omega_2 = s\omega_1$ , pentru pulsația electrică de alunecare a mașinii (sau pulsația curenților induși în colivia rotorică,)  $L'_{\sigma 2} = X'_{\sigma 2} / \omega_1$ ,  $L_m = X_m / \omega_1$  pentru inductanțele de dispersie rotorică și de magnetizare și  $L'_2 = L_m L'_{\sigma 2}$

Cuplul electromagnetic al mașinii asincrone funcționând la curentul imprimat de la CSF se poate exprima și în funcție de alunecarea  $s$ , rezultând conform schemei echivalente din fig.5.32:

$$\begin{aligned} M_m(s) &= 3p R'_2 L_m^2 \omega_2 / (R'^2_2 + \omega_2^2 L'^2_2) \cdot U_d^2 (\pi/3\sqrt{6})^2 / \\ &/ [(\pi^2/18)R_d + \Re\{Z_e\}]^2 = \\ &= (\pi^2/18) p R'_2 L_m^2 U_d^2 s [R'^2_2 + (s\omega_1 L'_2)^2] \cdot \{R_{le} [R'^2_2 + \\ &+ (s\omega_1 L'_2)^2] + s\omega_1^2 L_m^2 R'_2\}^2. \end{aligned} \quad (5.52)$$

unde,  $R_{le} = (\pi^2/18)R_d + R_l$  iar,  $Z_e$ , definește impedanța complexă echivalentă a mașinii asincrone (fig.5.32) a cărei parte imaginară este anulată de condensatorul variabil  $C_l$ , din prezentarea invertorului de curent.

Punând condiția de extrem  $\omega M_e(s) / \omega s = 0$  se obține din (5.52), ecuația de gradul IV în s:

$$(\omega_1^2 L_2'^2 s^2 - R_2'^2) (\omega_1^2 R_2'^2 L_2'^2 s^2 - \omega_1^2 L_m R_2' s + R_{1e}^2 R_2'^2) = 0, \quad (5.53)$$

ale cărei rădăcini,

$$s_{K_1'}^{(a)}, s_{K_1'}^{(b)} = \pm R_2' / \omega_1 L_2' \quad (5.54)$$

$$s_{K_1'}^{(c)}, s_{K_1'}^{(d)} = \left( L_m^2 R_2'^2 / 2 R_{1e} L_2'^2 \right) \left( 1 \mp \sqrt{1 - (2 R_{1e} L_2' / \omega_1 L_m^2)^2} \right), \quad (5.55)$$

reprezintă alunecările critice ale mașinii asincrone funcționând la curent imprimat de la CSF. Pentru întregul regim de motor ( $0 < s < 1$ ) al mașinii rezultă, în acest caz, trei alunecări critice.

$s_{K_1'}^{(c)}, s_{K_1'}^{(a)}, s_{K_1'}^{(d)}$ , la care corespund trei valori extreme ale cuplului,

$$M_{K_1'}^{(c)} \text{ (maxim)}, M_{K_1'}^{(a)} \text{ (minim)}, \text{ respectiv } M_{K_1'}^{(d)} \text{ (maxim)},$$

pe curba  $M_e(s)$  (fig. 5.33). Se observă forma caracteristicii mecanice a mașinii asincrone funcționând la curent imprimat, care diferă esențial de cea cunoscută, a mașinii alimentată în tensiune (curba  $M_e(s)$  trasată cu linie întreruptă în fig. 5.33).

Mașina asincronă de tracțiune nu poate funcționa la curent imprimat, pe porțiunea stabilă a caracteristicilor sale mecanice,  $0 < s < s_{K_1'}^{(c)}$  (fig. 5.33), unde  $\partial M_e / \partial s > 0$ , deoarece această porțiune corespunde unor alunecări foarte reduse ( $s_{K_1'}^{(c)} \ll 1$ , mărimea din paranteza de sub radical în (5.55) tinzând spre zero ca  $1 / L_m^2$ ), la care curentul statoric este exagerat de mare (nefiind limitat la  $s \rightarrow 0$  decât de rezistența  $R_{1r} \ll 1$ , conform expresiei sale din (5.52), saturând magnetic mașina și alterând factorul ei de putere.

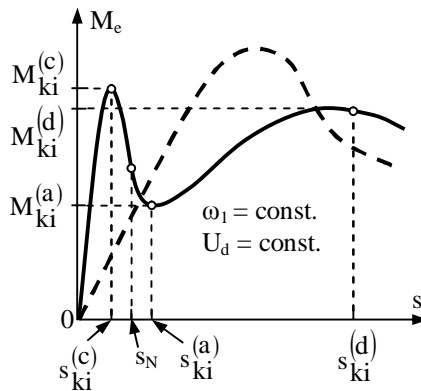


Fig.5.33. Caracteristica mecanică de regim permanent a unui motor asincron de tracțiune alimentat de la un invertor de curent (cu stingere autonomă).

Pe de altă parte, alunecarea nominală  $s_N$  a mașinii corespunde, pe caracteristica mecanică de funcționare la curent imprimat (fig 5.33), unei porțiuni instabile ( $\omega M_e / \omega s < 0$ ). Se impune așadar, un sistem de reglare a mașinii asincrone de tracțiune cu curent imprimat de la CSF pentru asigurarea unei funcționări static stabile în zona alunecărilor mici ( $s_{ki}^{(c)} < s < s_{ki}^{(c)}$ ). La VEMC operațional, sistemul de reglare se bazează de obicei, pe controlul curentului statoric  $I_1$  și al pulsației de alunecare  $\omega_2$ , conform expresiei (5.51) a caracteristicii mecanice de regim permanent .

Ecuția de cuplu (5,51) se poate scrie și în altă formă, dacă se înlocuiește curentul statoric  $I_1$  prin fluxul magnetic  $\varphi_m$  (valoarea efectivă a armonicii fundamentale) din întrefierul mașinii asincrone de tracțiune, definit, conform schemei echivalente din fig. 5.32, prin:

$$\varphi_m (= L_m I_m) = L_m I_1 [(R_2'^2 + \omega_2^2 L_2'^2) / (R_2'^2 + \omega_2^2 L_2'^2)]^{1/2}, \quad (5.56)$$

$I_m$  fiind valoarea efectivă a curentului (armonica fundamentală) din ramura transversală de magnetizare a schemei echivalente în T a mașinii (fig.5.32.). Din (5.51) și (5.56) rezultă expresia cuplului electromagnetic sub forma:

$$M_e(\varphi_m, \omega_2) = 3 / R'_2 \varphi_m^2 \omega_2 / (R'^2_2 + \omega_2^2 L'^2_{\omega_2}). \quad (5.57)$$

În domeniul frecvențelor statorice subnominale, funcționarea la cuplu constant a mașinii asincrone de tracțiune cu curent imprimat de la CSF se obține conform ecuației (5.57) prin menținerea constantă a pulsației de alunecare  $\omega_2$  și a fluxului magnetic principal  $\varphi_m$ . Valoarea curentului statoric  $I_1$  pentru care  $\varphi_m = \text{const.}$ , se poate prescrie în funcție de  $\omega_2$  din ecuația implicită (5.56) cu o constantă în membrul stâng. Această ecuație depinde, însă, și de rezistența rotorică  $R'_2$  variabilă cu temperatura mașinii. De aceea transformatorului funcțional de prescriere a lui  $I_1(\omega_2)$  conform (5.56) trebuie să i se aplice o corecție de temperatură [17,51].

La rândul ei, pulsația de alimentare  $\omega_2$  se adună cu pulsația electrică instantanee  $\omega$  a rotorului, pentru a se obține pulsația  $\omega_1$  de comandă a invertorului de curent, respectiv de alimentare a statorului mașinii asincrone de tracțiune.

Pentru ca VEMC să obțină viteze suficient de mari (respectiv mașina de tracțiune să aibă turații ridicate), după atingerea tensiunii-limită a invertorului (respectiv tensiunii nominale a mașinii de tracțiune) creșterea în continuare a frecvenței  $f_1$  trebuie să decurgă la tensiunea constantă. Dar aceasta înseamnă reducerea cuplului electromagnetic al mașinii de tracțiune, conform ecuației (5.52) în care  $U_d = \text{const.}$  și  $(s \omega_1 L'^2_2)^2 \gg R'^2_2$ , la  $\omega_1$  mărit. Ca urmare, în domeniul frecvențelor



supranominale , mașina asincronă de tracțiune va funcționa la putere constantă ceea ce revine la:

$$M_e \omega = M_e (\omega_1 - \omega_2) = k = \text{const.} \quad (5.58)$$

În acest caz rezultă pentru pulsația de alunecare  $\omega_2$  o variație (în funcție de  $\omega$ ) de forma:

$$\omega_2^2 - (3p R_2 L_m^2 I_1^2 \omega / K L_2^2) \omega_2 + L_2^2 / L_2^2 = 0, \quad (5.59)$$

dedusă din (5.51) și (5.58), cu bună aproximație ecuația (5.59), reprezintă o dreaptă. Sistemul de reglaj al mașinii de tracțiune trebuie să genereze numai segmentul de pe această dreaptă de aproximare de limitat (a) superior de punctul  $(\omega', \omega'_2)$  cu  $\omega' = p k_v v_{\max}$  ( $v_{\max}$  fiind viteza maximă a VMC, iar  $k_v$ , coeficientul de transformare din rad/s în km/h), respectiv cu  $\omega'_2$  obținut din ecuația (5.59) pentru  $\omega'$ , și (b) inferior de punctul  $(\omega'', \omega''_2)$ , cu  $\omega'' = p k_v v''$  determinat de viteza  $v''$  a VEMC, la care se atinge tensiunea – limită a inverterului, respectiv cu  $\omega''_2$  obținut din (5.59) pentru  $\omega''$ . Rezultă astfel, segmentul treptei de aproximare.

$$(\omega - \omega'') / (\omega' - \omega'') = (\omega_2 - \omega''_2) / (\omega'_2 - \omega''_2) \quad (5.60)$$

sau

$$\omega'' = b_1 \omega = b_0 + b_1 (p k_v v) = b_0 + b'_1 v, \quad (5.61)$$

cu  $b_0, b_1, b'_1$ , constante pozitive. Relația (5.61) trebuie asigurată prin sistemul de reglare al mașinii asincrone de tracțiune, funcționând cu curent imprimat și la putere constantă, în domeniul frecvențelor  $f_1$  supranominale.

O asemenea funcționare corespunde fazei de mers a regimului de tracțiune a VEMC a cărei dinamică va putea fi descrisă, deci prin ecuațiile:

$$f_t = K (b_0 + b'_1 v) I_1^2 / (b''_0 + b''_1 v + b_2 v^2), \quad (5.62)$$

$$f_r = a_0 + a_2 v^2, \quad (5.63)$$

$$dv/dt = \phi(f_t - f_r). \quad (5.64)$$

În expresia (5.62) a forței specifice de tracțiune s-a ținut seamă de relațiile (5.51), (5.61) și s-a notat:

$b_0 = R_2^2 + b_0^2 L_2^2$ ,  $b_{-1} = 2 b_0 b_{-1} L_2^2$ ,  $b_2 = (b_{-1} L_2)^2$ ,  $K = 3i_t p \eta_t L_m^2 N_M R_2 / r_R G$ , cu aceeași semnificație a mărimilor  $i_t$ ,  $\eta_t$ ,  $N_M$ ,  $r_R$ ,  $G$  ca în (5.1) și (5.2). La rândul lor ecuațiile anterioare (5.63), (5.64) sunt identice cu (5.3), respectiv, (5.4).

Condiția de stabilitate a mișcării utile în regim de tracțiune (3.18) este îndeplinită în cazul VEMC propulsat cu motoare asincrone funcționând la putere constantă, cu curent imprimat de la CSF și cu variație liniară cu viteza de pulsației de alunecare, întrucât din (5.62) ÷ (5.64) rezultă:

$$(\omega_{f_r} / \omega v)_v^0 = 2a_2 v^0 > 0 > -K i_u^2 b_{-1} b_2 v^{02} + 2b_0 b_2 v^0 + b_0 b_{-1}) \cdot (b_0 + b_{-1} v^0 + b_2 v^{02})^{-2} = (\omega_{f_r} / \omega v)_v^0 \quad (5.65)$$

în ipotezele  $I_1 = \text{const.}$  și  $(b_0 L_2^2 \gg R_2^2)$ , la abateri mici față de regimul de mișcare de bază (cu viteza  $v^0$ ) l VEMC.

*Observația 5.5.* există o limită superioară a domeniului de funcționare la putere constantă a mașinii asincrone de tracțiune cu curent imprimat de la CSF, limită la care pulsația de alunecare  $\omega_2$  crescând, atinge valoarea

$$\omega_2 k_i \omega^{(a)} = s_{ki}^{(a)} \omega_1 = R_2^2 / L_2^2.$$

Dacă pulsația de alunecare  $\omega_2 k_i \omega^{(a)}$  este inferioară valorii  $\omega_2$  corespunzătoare vitezei maxime a VEMC, atunci în funcționarea la curent imprimat a mașinii asincrone de curent, în domeniul frecvențelor  $f_1$  supranominale, apare un regim de lucru distinct: la pulsație de alunecare critică  $\omega_2 = \omega_2 k_i \omega^{(a)}$  și tensiunea constantă.

- În regimul de frânare electrică al VEMC echipat cu mașini asincrone de tracțiune si CSF de curent imprimat, sunt posibile două moduri de funcționare ale sistemului de propulsie:

- cu mașina de tracțiune frânând recuperativ ca generator la viteze suprasincrone; pentru ca puterea activă să fie transferată de la mașină prin inverterul de curent și de VTC, înapoi în LC de c.c., trebuie ca polaritatea tensiunii  $U_d$  a circuitului intermediar de c.c. al CSF să se inverseze;

- cu mașina de tracțiune frânând ca generator autoexcitat decuplat de la LC și debitând în scurtcircuit sau pe un rezistor de frânare, plasat în circuitul intermediar al CSF; autoexcitația mașinii este asigurată de curenții de circulație ai inverterului în condițiile în care nivelul tensiunii este determinat intern de saturația magnetică a mașinii, iar frecvența statorică,  $f_1$  este impusă din exterior, ca frecvență de comandă a inverterului.

La ambele tipuri de frânare electrică a VEMC puterea reactivă necesară magnetizării mașinii de tracțiune este furnizată de condensatoarele inverterului prin mecanismul comutației acestuia.

Reglarea sistemului de propulsie al frânarea electrică a VEMC se realizează cel mai simplu, prin impunerea unei valori negative constante, pentru pulsația de alunecare,  $\omega_2$ . Pulsația  $\omega_1$  de comandă a inverterului de curent rezultă, astfel inferioară pulsației electrice instantanee  $\omega$  a rotorului mașinii de tracțiune,  $\omega_1 = \omega + (-\omega_2) < \omega$ . Întrucât inverterul de curent nu poate opera la  $\omega_1 = C$ , rezultă că diferența  $\omega - \omega_2$  trebuie limitată la o valoare nenulă prin sistemul de reglare.

Contrar regimului de tracțiune al VEMC, la frânarea electrică se pretinde cuplul maxim al mașinii de tracțiune (uneori, depășind cuplul dezvoltat la pornire) chiar la viteze mari ale VEMC. În consecință, lipsește pe caracteristica de frânare electrică a VEMC domeniul de slăbire al fluxului magnetic și de

limitare a tensiunii la bornele mașinii. Aceasta conduce, însă, la o funcționare instabilă, în regim de frânare recuperativă a mașinii și la curenți inadmisibili de mari prin înfășurarea ei statorică. Pentru înlăturarea acestui neajuns se înseriază, pe durata frânării electrice (recuperative a VEMC) la viteze mari, un rezistor trifazat adițional pe partea de c.a. (mai rar, pe partea de c.c.) a invertorului.

În cazul frânării electrice a VEMC cu mașina asincronă de tracțiune în regim de generator autoexcitat, debitând în scurt circuit sau pe un rezistor de frânare, condiția de autoexcitație rezultă aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff pe ochiul circuitului pasiv (fără sursă echivalentă de c.a.) din fig 5.32.:

$$\underline{Z}I_1 = 0 \quad (5.66)$$

unde,  $\underline{Z}$  reprezintă impedanța complexă globală a circuitului echivalent parcurs de curentul  $I_1$  (armonică fundamentală) întrucât  $I_1 \neq 0$ , condiția (5.66) revine la:

$$\Re \{ \underline{Z} \} = 0, \Im \{ \underline{Z} \} = 0. \quad (5.67)$$

A doua dintre relațiile anterioare este automat satisfăcută prin modul în care a fost definită capacitatea variabilă  $C_1$  la modelarea invertorului de curent (cu stingere autonomă) rămâne, așadar, prima condiție din (5.67) în care se scrie dezvoltat:

$$(R_{1e}s + R_2) s\omega_1 L_m^2 + R_{1e}\omega_1 L^2_{\sigma 2} s^2 + R_{1e}R_2^2 = 0. \quad (5.68)$$

Ecuția pătratică în  $L_m$  și  $s$  (5.68), împreună cu caracteristica de magnetizare  $L_m(\psi_m)$  a mașinii de tracțiune, determină soluția de regim permanent a procesului de autoexcitație a mașinii funcționând ca generator, la curent imprimat de la CSF. Se constată că saturația magnetică a mașinii asincrone de tracțiune, în cazul aceste frânări electrice a VEMC, joacă un rol esențial în stabilirea condiției de autoexcitație a mașinii (spre deosebire de

cazul frânării electrice recuperative a VEMC, unde saturația magnetică nu are decât un rol secundar). Totuși acest mod de autoexcitație este conceptual mai simplu decât autoexcitația capacitivă a mașinii asincrone convenționale, deoarece pulsația statorică,  $\omega_1$  fiind impusă prin schema de reglare a mașinii, alunecarea  $s$  controlează direct (conform ecuației (5.68)) inducția de magnetizare  $L_m$  și, prin aceasta, fluxul magnetic principal  $\psi_m$  al mașinii.

În fig.5.34 se prezintă schema de principiu a circuitului de forță al unui VEMC cu sistem de propulsie VTC – inverter trifazat de curent (cu stingere autonomă) – mașini de tracțiune asincrone (cu rotor în colivie).

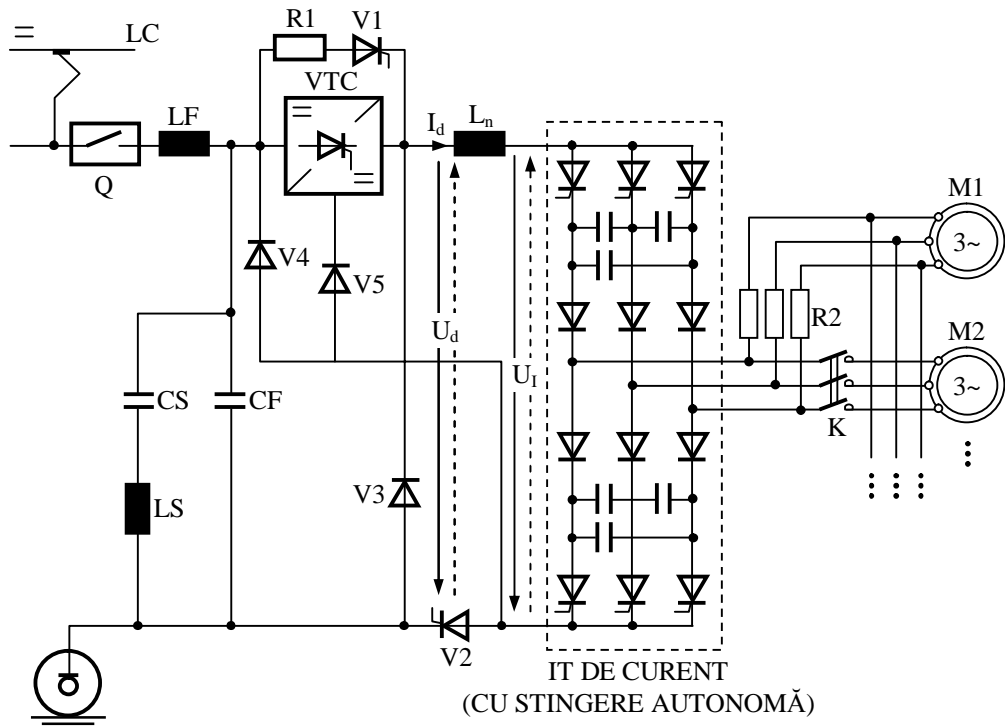


Fig.5.34 schema de principiu a circuitului de forță al unui VEMC cu sistem de propulsie VTC – inverter trifazat de curent – mașini asincrone de tracțiune.

Se observă că elementele constitutive de bază ale acestui circuit de forță sunt similare celor din fig.5.5b și 5.25a, cu singura deosebire că, mașinile de tracțiune de c.c. serie au fost înlocuite prin ansamblul inverter de curent – mașini asincrone de tracțiune.

Racordarea la LC de c.c., a circuitului de forță a VEMC din fig.5.34, se face prin intermediul unui întrerupător automat de joasă tensiune Q și un filtru tampon, format din bobina LF și condensatorul CF. La dimensionarea acestui filtru trebuie avut în vedere că armonicile curentului statoric imprimat trec în circuitul intermediar de c.c. al CSF, sunt modulate de VTC (dacă nu sunt suficient filtrate) generează componente alternative adiționale, în circuitul electric de tracțiune; la anumite viteze ale VEMC (respectiv, turații ale mașinilor asincrone de tracțiune) aceste componente alternative pot avea frecvența de 50 Hz și, ca urmare, pot interfera electromagnetic cu semnalele utile din circuitele conexe de semnalizare și de telecomunicații de frecvență industrială (de exemplu circuitele de cale de metrou). De aceea, în filtrul tampon se înglobează, uzual un circuit rezonant L-C acordat pe frecvența de 50 Hz; în fig.5.34 acest circuit absorbant este format din bobina LS și condensatorul CS.

VTC împreună cu dioda de regim liber V3 constituie un prim grup de comutații, ce operează cu frecvența de tact a VTC (uzual, de  $250 \div 450$  Hz). Un al doilea grup este format din tiristorul V2 de comutație (electronică) tracțiune/ frânare și din dioda de frânare electrică V4. Tiristorul V2 este conectat, prin intermediul diodei V5, la circuitul de comutație forțată al VTC.

Prin intermediul VTC se modifică amplitudinea curentului  $I_d$  din circuitul intermediar de c.c. al CSF.

Bobina de netezire  $L_n$ , de inductanță relativ mare (de ordinul mH) din circuitul intermediar, este dimensionată astfel încât să asigure pentru curentul  $I_d$  un factor de ondulație  $d \pm 10 \div 20 \%$ .

Invertorul trifazat de curent cu stingere autonomă poate alimenta în paralel  $1 \div 4$  mașini asincrone de tracțiune și operează uzual, în domeniul de frecvență  $0 \div 200$  Hz, folosind modulația cu 3,5 sau 7 pulsuri la frecvența sub 10 Hz.

Schimbarea sensului de rotație al mașinilor asincrone de tracțiune se obține prin inversarea ordinii impulsurilor de comandă ale invertorului.

Prin intermediul invertorului trifazat de curent se modifică pulsația statorică  $\omega_1$  a mașinilor asincrone de tracțiune. Dispozitivul de comandă al invertorului calculează pulsația statorică  $\omega_1$  din însumarea algebrică a pulsației electrice  $\omega$  a rotorului (corespunzătoare vitezei instantanee de rotație a mașinii de tracțiune, măsurată cu un tahogenerator de rezoluție mare) cu valoarea de referință a pulsației de alunecare  $\omega_2$ .

Mașinile de tracțiune asincrone cu rotor în colivie sunt, uzual tetrapolare, în construcție închisă cu puteri până la 200 kW și turații maxime până la 6000 rot/min.

În regimul de tracțiune al VEMC, tiristorul V2 de comutație tracțiune / frânare este permanent în conducție iar contactorul K, de scurtcircuitare al rezistorului trifazat adițional de frânare R2 este închis.

Pe durata de conducție a VTC tensiunea  $U_d$  a circuitului intermediar este pozitivă (având sensul marcat cu linie plină în fig.5.34). și egală cu tensiunea  $U_{CF}$  pe condensatorul CF al filtrului tampon. Curentul  $I_d$ , trecând prin bobina de netezire  $L_n$

din circuitul intermediar spre inverter, crește dependent de diferența dintre tensiunea  $U_d$  și tensiunea  $U_i$  pe partea de c.c. a inverterului ( $U_i$  fiind pozitivă, cu sensul marcat cu linie plină în fig.5.34.). mai departe acest curent se repartizează în blocuri dreptunghiulare între cele trei faze ale înfășurării statorului mașinii de tracțiune, la frecvența impusă de inverter.

În timpul blocării RTC, tensiunea  $U_d$  devine 0, curentul  $I_d$  circulă prin tiristorul V2 și dioda de regim liber V3 – fiind întreținut de inductanța  $L_n$  a circuitului intermediar – și descrește dependent de tensiunea inverterului  $U_i$ .

Frânarea electrică a VEMC se obține trecând mașinile asincrone de tracțiune în regim de generator, prin comanda scăderii pulsației statorice  $\omega_1$  sub valoarea instantanee a pulsației electrice  $\omega$  a rotorului, ceea ce revine la comanda schimbării semnului pulsației de alunecare  $\omega_2$ .

În regimul de frânare electrică al VEMC, tiristorul V2 de comutație tracțiune / frânare este blocat, iar contactorul K este deschis la viteze mari de frânare ale VEMC, permițând înserierea în circuitul electric dintre inverter și mașinile asincrone de tracțiune a rezistorului trifazat adițional R2 (odată cu reducerea vitezei de frânare a VEMC, K se închide, scurtcircuitând pe R2). Ca urmare a blocării lui V2, VTC este conectat în paralel cu inverterul de curent.

Pe durata conducției VTC, tensiunea  $U_d$  a circuitului intermediar este nulă. Curentul debitat de mașinile asincrone de tracțiune – funcționând ca generatoare autoexcitate în scurtcircuit – este transferat de inverterul de curent – funcțional la rândul lui ca redresor comandat – în circuitul intermediar de c.c. unde, parcurgând dioda de frânare V4 și bobina de netezire  $L_n$  (în



același sens ca în regim de tracțiune), crește dependent de tensiunea inverterului  $U_i$ .

În timpul blocării VTC energia acumulată în bobina de netezire  $L_n$  pe durata conducției VTC este :

- fie returnată în LC curentul debitat de mașinile asincrone de tracțiune, aflate în regim de generator recuperativ, suprasincron, circulând prin dioda de frânare  $V_4$ , filtrul tampon și dioda de regim liber  $V_3$ ;

- fie disipată sub formă de căldură în rezistorul de frânare  $L_1$ , comandat de tiristorul  $V_1$  în cazul când  $V_c$ , nu poate prelua energia recuperată prin frânarea VEMC; în acest caz curentul de frânare, debitat de mașinile de tracțiune funcționând ca generatoare autoexcitate, circulă prin dioda de frânare  $V_4$ , rezistorul de frânare  $R_1$ , tiristorul  $V_1$  și bobina de netezire  $L_n$ .

La frânarea electrică recuperativă respectiv reostatică, a VEMC, tensiunea  $U_d$  a circuitului intermediar are polaritatea inversată (conform săgeții marcate cu linie în fig.5.34), fiind egală cu  $(-U_{CF})$ , respectiv  $(-R_1 I_d)$ . Curentul  $I_d$  din circuitul intermediar, își menține sensul prin bobina de netezire  $L_n$  și descrește dependent de diferența dintre tensiunile  $U_{CF}$ , respectiv,  $R_1 I_d$ , și  $U_1$  (aceasta din urmă având și ea polaritatea inversată conform săgeții marcate cu linie întrerupă în fig.5.34)

Deoarece, de fiecare, dată, intrarea în conducție a VTC (prin reaprinderea tiristorului său principal) determină blocarea tiristorului de frânare  $V_1$  (în serie cu  $R_1$ ), rezultă că repartizarea energiei de frânare a VEMC între LC și rezistorul de frânare  $R_1$  (în funcție de receptivitatea LC, estimată prin nivelul tensiunii  $U_{CF}$  pe condensatorul de filtrare CF) se efectuează pe fiecare perioadă de tact a VTC.

VTC din fig. 5.34 este conceput cu o structură particulară a circuitului său de comutație, (nedetaliată în fig. 5.34), care asigură un grad de libertate în alegerea momentului  $t_d$  de debut al descărcării condensatorului de stingere din acest circuit. Dacă se alege momentul de timp  $t_d$ , astfel încât să aparțină perioadei de conducție a tiristorului principal al VTC, atunci tiristorul V2 este reținut în conducție și funcționarea corespunde regimului de tracțiune al VEMC. Dacă dimpotrivă, momentul de timp  $t_d$  este selectat după blocarea tiristorului principal al VTC, adică în perioada când  $U_d = 0$ , atunci se produce tranziția din regimul de tracțiune al VEMC în cel de frânare electrică. Astfel curentul  $I_d$  comută din ramura de circuit formată din tiristorul V2 și dioda de regim liber, în ramura formată din dioda F5 și circuitul rezonant de stingere al VTC, iar, apoi, după blocarea lui  $V_2$ , în ramura formată din dioda de frânare,  $V_4$  și tiristorul principal (care s-a amorsat al VTC). În continuare, pe toată durata frânării electrice a VEMC, tiristorul V2 rămâne blocat.

Comutația inversă frânare/tracțiune se poate efectua prin aprinderea tiristorului V2 simultan cu a tiristorului principal al VTC.

Din cele anterioare, se constată că ansamblul format din VTC (cu structură particulară a circuitului său de comutație), tiristorul V2 și dioda V3 funcționează în fapt, ca un VTC de două cadrane.

## **CAPITOLUL 6**

### **VEM ALIMENTATE ÎN CURENT ALTERNATIV (VEMA)**

## INTRODUCERE

În cazul VEM de transport interurban distanțele fiind considerate mai mari decât în cazul tracțiunii urbane, linia de contact este alimentată de la tensiunea alternativă. Avantajul este că se pot transporta puteri mari cu pierderi minime și se poate ușor adapta nivelul tensiunii la necesitățile impuse de tracțiunea electrică.

VEMA alimentate de la LC de c.a. au propulsia cu motoare de c.c. de tip serie, cu motoare monofazate cu colector, sau cu motoare asincrone trifazate.

### **6.1. VEMA PROPULSATE CU MAȘINI DE TRACȚIUNE DE C.C. SERIE**

Schema de principiu a unui VEM alimentat de la LC de c.a. printr-un transformator reglabil și un redresor este prezentată în fig. 6.1.

Transformatorul principal are în secundar trei înfășurări:

- pentru instalații auxiliare 220 V (compresoare de aer comprimat, ventilatoare, etc.);
- pentru încălzirea trenului 1500 V;
- pentru alimentarea motoarelor de tracțiune prin intermediul redresorului V1.

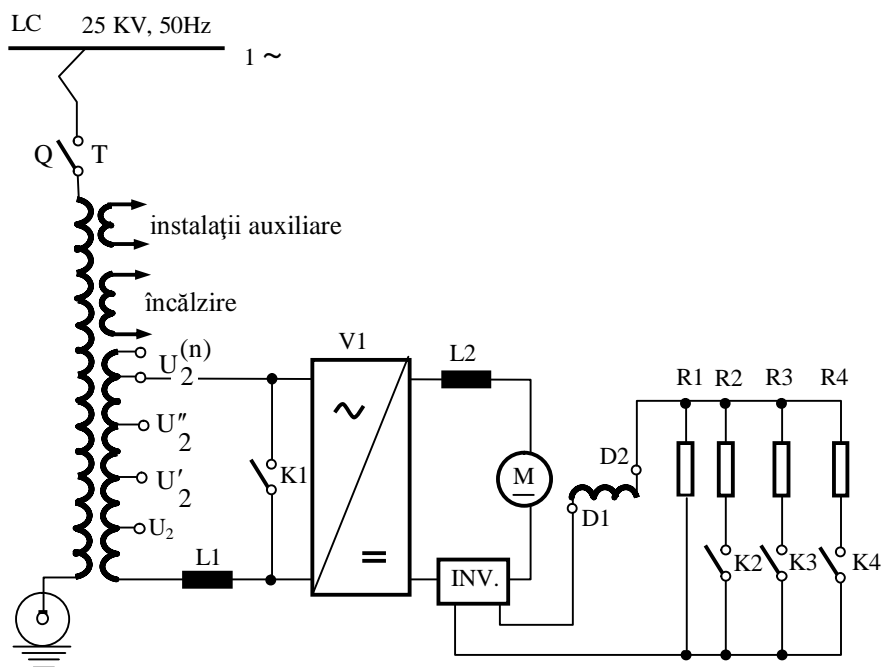


Fig 6.1 Schema de principiu al unui VEM alimentat monofazat prin redresor.

Pentru trecerea de la o priză la alta a înfășurării secundare este prevăzut un dispozitiv de comutare numit graduator. Rolul bobinei L1 este a mări impedanța circuitului în caz de avarie, atunci când scurtcircuitul K1 scoate de sub tensiune redresorul. În acest fel se obține o limitare a curentului de scurtcircuit prin transformatorul principal. Șuntarea permanentă a excitației prin rezistența R1 are ca efect micșorarea ondulației fluxului inductor, în vederea îmbunătățirii comutației. Rezistențele R2, R3 și R4, conectate prin contactoarele K2, K3 și K4 servesc pentru subexcitarea motorului de tracțiune. Bobina L2 înseriată cu indusul mașinii are rolul de a evita regimul de conducție întreruptă la tensiune și sarcini reduse.

Schema electrică din fig.6.1 este aplicabilă în general la locomotive de putere mică. La locomotivele de putere mare, reglarea tensiunii se realizează de obicei pe partea de înaltă tensiune a transformatorului principal.

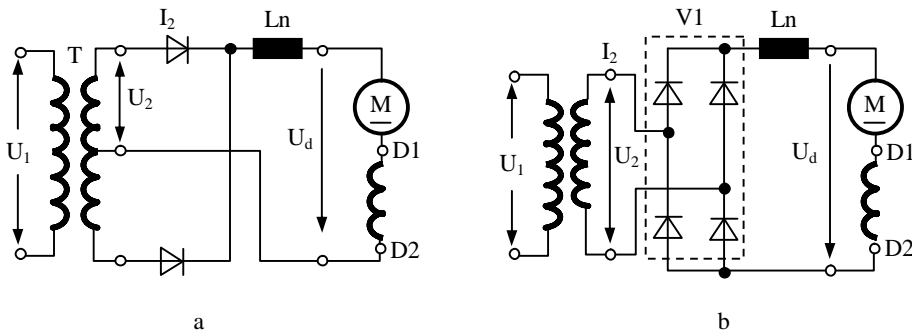


Fig 6.2. Scheme de redresare: a – redresor monofazat cu punct median;  
b - redesor monofazat în punte.

Ca redresoare se utilizează scheme cu redresarea ambelor alternanțe: schema cu punct median (fig.6.2a) și schema în punte monofazată (fig.6.2b).

În tabelul 6.1 sunt date relațiile dintre curentul  $I_2$ , tensiunea  $U_2$ , puterea  $P_2$  din secundarul transformatorului, curentul redresat  $I_d$ , tensiunea medie redresată  $U_d$  și puterea redresată  $P_d$

Tabelul 6.1.

Tipul redresorului monofazat	$I_2$	$U_2$	$P_2$	$P_1$
Cu punct median	$0,71 I_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$	$1.57 P_d$	$1,34 P_d$
În punte	$I_d$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$	$1.11 P_d$	$1.11 P_d$

Rezultă că pentru aceeași putere în circuitele de curent continuu, transformatorul care alimentează o punte redresoare are o putere inferioară transformatorului conectat la o schemă de redresare cu punct median.

În cazul schemei de redresare cu punct median numărul de elemente semiconductoare este jumătate față de schema de redresare în punte, în timp ce tensiunea inversă pe element semiconductor, este dublă.

### **6.1.1. Regimul de tracțiune**

Pornirea și reglarea vitezei se realizează în principal, prin reducerea tensiunii de alimentare aplicată motorului de tracțiune. Se utilizează două metode de modificare a tensiunii, aplicate motorului:

- în cazul punții necomandate, secundarul transformatorului este prevăzut cu prize (fig.6.1);

- în cazul punții semicomandate (fig.6.5) sau complet comandate (fig.6.6), modificarea tensiunii redresate se realizează prin unghiul  $\alpha$  de intrare în conducție a tiristoarelor, astfel că transformatorul de rețea nu ar mai necesita prize.

În cazul punții necomandate, valoarea minimă a tensiunii în secundarul transformatorului trebuie să asigure, fără nici o rezistență suplimentară cuplul de pornire maxim (fig.6.5):

$$M_p K \Phi I_p = 2 M_N. \quad (6.1)$$

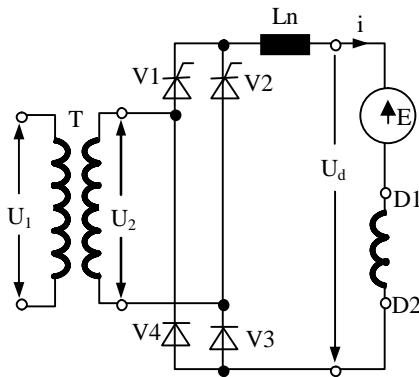


Fig. 6.3. Schema de principiu a VEMA alimentat printr-un redresor semicomnatat.

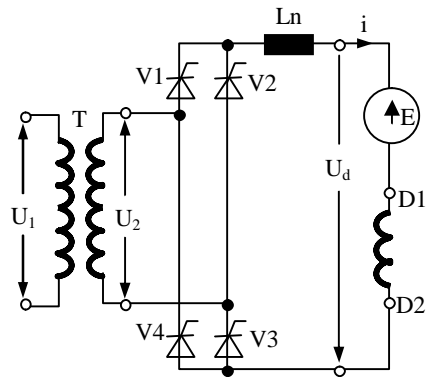


Fig. 6.4. Schema de principiu a VEMA alimentat printr-un redresor complet comandat.

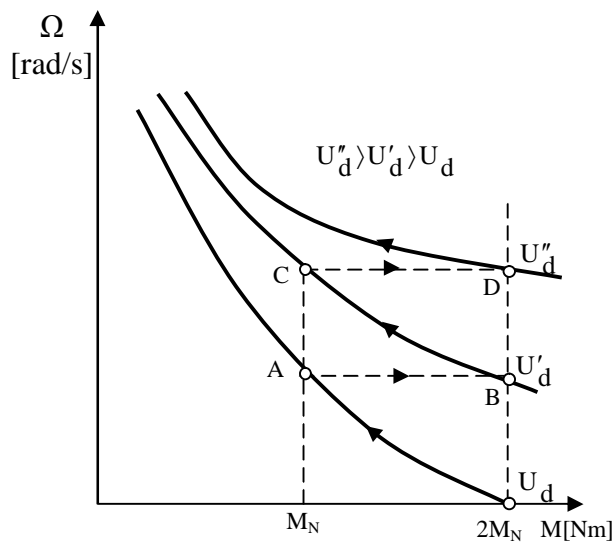


Fig.6.5. Caracteristicile mecanice la pornirea VEMA alimentat prin punte necomandată.

Se are în vedere că în timpul pornirii, cuplul se modifică între valoarea sa nominală (minim) și de două ori valoarea nominală (maxim). În acest interval, mașina lucrează saturat iar



cuplul are o variație liniară cu curentul indusului. Rezultă curentul maxim de pornire:

$$I_{P,max} = \frac{2M_N}{(K\phi)_2}, \quad (6.2)$$

unde  $(K\Phi)_2$  este fluxul prin mașină la pornire.

În momentul pornirii, tensiunea electromotoare indusă prin rotație fiind 0, ecuația mașinii este:

$$U_d = R_M I_{P,max}. \quad (6.3)$$

Înlocuind tensiunea medie redresată  $U_d$  în funcție de tensiunea din secundarul transformatorului din tabelul 6.1 și curentul din relația (6.2), se obține :

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_d = R_M \frac{2M_N}{(K\phi)_2} \quad (6.4)$$

rezultă valoarea minimă a tensiunii în secundarul transformatorului (valoarea prizei pentru pornire):

$$U_{2,min} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{R_M}{(K\phi)_2} M_N \quad (6.5)$$

În punctul A de pe caracteristica mecanică artificială (fig.6.5) se comută transformatorul pe următoarea priză de tensiune a cărei valoare se calculează în felul următor.

În punctul A, t.e.m. ajunge la valoarea :

$$E_A = (K\Phi)\Omega_A, \quad (6.6)$$

unde,  $(K\Phi)_1$  reprezintă fluxul prin mașină la curent nominal.

Ecuația mașinii în punctul A se poate scrie :

$$U_d = E_A + R_M I_N. \quad (6.7)$$

Înlocuind tensiunea medie redresată minimă  $U_d$  în funcție de tensiunea în secundarul transformatorului, t.e.m.  $E_A$  din relația 6.6 și curentul în funcție de cuplu  $I_N = M_N / (K\Phi)_1$  rezultă valoarea

vitezei la care se comută transformatorul:

$$\Omega_A = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi(K\phi)_1} - \frac{R_M}{(K\phi)_1^2} M_N. \quad (6.8)$$

Ecuția mașinii în punctul B de pe noua caracteristică artificială este:

$$U_d = E_A + R_M \frac{2M_N}{(K\phi)_2} \quad (6.9)$$

Înlocuind  $U_d$  în funcție de  $U_2$  din tabelul 6.1 și  $E_A$  din relația 6.6. în care  $\Omega_A$  are valoarea dată în (6.8) rezultă:

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 + R_M \left[ \frac{2}{(K\phi)_2} - \frac{1}{(K\phi)_1} \right] M_N \quad (6.10)$$

de unde se obține cea de-a doua treaptă de tensiune în secundarul transformatorului:

$$U_2 = U_2 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot R_M \left[ \frac{2}{(K\phi)_2} - \frac{1}{(K\phi)_1} \right] M_N \quad (6.11)$$

În mod similar se determină și celelalte trepte de tensiune în secundarul transformatorului. Treptele superioare se fac mai dese pentru a putea efectua o reglare mai fină a motorului.

La acest sistem de reglare, factorul de putere al acționării se modifică în limite restrânse rămânând la valori admise.

În regim de mers motorul fiind alimentat de la o rețea de tensiune alternativă monofazată printr-o punte necomandată, curentul prin mașină are o componentă continuă și una alternativă. Componenta alternativă a curentului are efecte negative determinând pulsații în cuplu și înrăutățind comutația. Pentru netezirea fluxului, înfășurarea de excitație a motorului de tracțiune este șuntată de rezistența  $R_1$  (fig 6.1), în acest fel tensiunea electromotoare, poate fi considerată constantă.

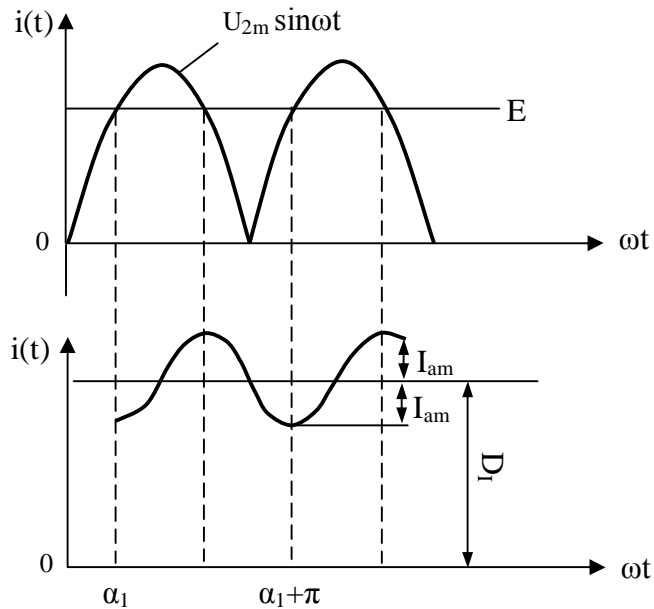


Fig.6.6. Tensiunea redresată și curentul prin motor la alimentarea prin punte necomandată.

Ecuția circuitului format din înfășurarea secundară a transformatorului de alimentare și circuitul rotoric este:

$$U_2 = E + R_t i + L_t \frac{di}{dt} \quad (6.12)$$

Unde:

$$U_2 = U_{2m} \sin \omega t;$$

$R_t$  – rezistența totală din circuit;

$L_t$  – inductivitatea totală din circuit

Soluția ecuației (6.12) este de forma:

$$i(t) = \frac{U_{2m}}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \sin(\omega t - \rho) - \frac{E}{R_t} + A. \quad (6.13)$$

Constanta A se determină din condiția ca, la unghiul  $\alpha_1$  și  $\alpha_1 + \pi$ , curentul să aibă aceleași valori (fig. 6.6).

Rezultă pentru constantă valoarea:

$$A = \frac{2U_{2m} \sin(\alpha_1 - \rho)}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \cdot \frac{e^{\infty_1} \frac{R_t}{X_t}}{-\frac{\pi R_t}{X_{t-1}}} \quad (6.14)$$

înlocuind constanta 6.14 în expresia curentului 6.13, rezultă pentru aceasta expresia:

$$i(t) = \frac{2U_{2m} \sin(\alpha_1 - \rho)}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \cdot \frac{-\left(\omega t - \alpha_1\right) \frac{R_t}{X_t}}{-\frac{\pi R_t}{X_t}} + \frac{U_{2m}}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \sin(\omega t - \rho) - \frac{E}{R_t} \quad (6.15)$$

Se definește coeficientul de pulsație al curentului din relația

$$s_i = \frac{I_{am}}{I_a} \quad .$$

Se poate considera curentul redresat ca fiind suma dintre componenta sa continuă  $I_a$  și componenta sa sinusoidală de frecvență dublă față de frecvența liniei de contact.

Dacă deci:

$$i(t) = I_a + I_{am} \sin 2\omega t. \quad (6.16)$$

atunci tensiunea medie redresată, ținând cont de unghiul de suprapunere este dată de relația:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \gamma) \quad (6.17)$$

unde,

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2X_d \cdot I_d}{U_{2m}} \quad (6.18)$$

$x_d$  — reactanța echivalentă de dispersie raportată la secundarul transformatorului;

$i_d$  – curentul mediu redresat.

În intervalul de comutație  $\sigma$ , tensiunea redresată este 0. Deci, din cauza fenomenului de suprapunere, tensiunea redresată, furnizată motorului, scade.

În cazul utilizării unei punți semicomandate (fig.6.3) sau complet comandate (fig.6.4) reglarea tensiunii redresate se face prin modificarea unghiului  $\alpha$  de intrare în conducție al tiristoarelor. În acest caz transformatorul de rețea nu mai necesită priză.

Tensiunea medie redresată (la curent rotoric neîntrerupt), pentru puntea complet comandată are valoarea:

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha, \quad (6.19)$$

unde,  $U_2$  – valoarea efectivă a tensiunii secundare și  $m = 2$  pentru puntea monofază.

Pentru puntea semicomandată, tensiunea medie redresată este dată de relația:

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \eta_2 (1 + \cos \alpha) \quad (6.20)$$

Admițând inductivitatea de filtraj foarte mare în figura 6.7 s-a reprezentat variația tensiunii și a curentului în secundarul transformatorului pentru puntea semicomandată (a) și complet comandată (b).

Domeniul de reglaj la puntea semicomandată este:  $0 < \alpha < 180^\circ$ , iar la puntea complet comandată:  $0 < \alpha < 90^\circ$ . Alimentarea prin punte semicomandată se aplică în exclusivitate vehiculelor care nu necesită frânare recuperativă.

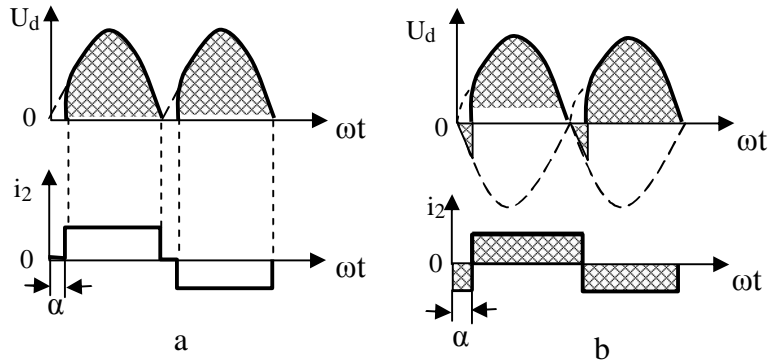


Fig. 6.7. Forma de undă a tensiunii redresate și a curentului în secundarul transformatorului: a) punte semi-comandată; b) punte complet comandată.

Prin controlul de fază se realizează cu multă ușurință reglajul tensiunii redresate dar acest lucru are și consecințe negative, datorită faptului că, în mod corespunzător, se defazează și fundamentală curentului de linie față de tensiunea aplicată, astfel că redresorul absoarbe de la rețea putere reactivă. Deci, redresorul se prezintă ca un aparat deformant complex, care absoarbe de la rețea puterea activă  $P$ , reactivă  $Q$  și deformantă  $D$ .

Se definește factorul de putere totală sau de regim deformant al redresorului, ca raport între puterea activă și puterea aparentă.

$$K = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} =$$

$$= \cos \rho \cdot \frac{3U_1 I_1}{3U_1 I_{1,ef}} \quad (6.21)$$

notând cu  $\delta = \frac{I_{1,ef}}{I_1}$  factorul de distorsiune, relația devine:

$$K = \cos \varphi \cdot \frac{1}{\delta} \quad (6.22)$$

Admițând  $\varphi=\alpha$ , se observă că cel de-al doilea termen din expresia factorului de putere total se datorează controlului de fază.

În prezent pe vehicule, pentru a obține un factor de putere satisfăcător, alimentarea motoarelor de tracțiune se face prin înserierea mai multor punți redresoare (până la 4), comandate succesiv. Acest lucru necesită câte o înfășurare a transformatorului de rețea pentru fiecare punte redresoare.

În cazul utilizării în componența punții redresoare a tiristoarelor cu stingere pe poartă (GTO) sau a tranzistoarelor de putere, prin comanda adecvată se poate obține un factor de putere unitar (fig.6.8).

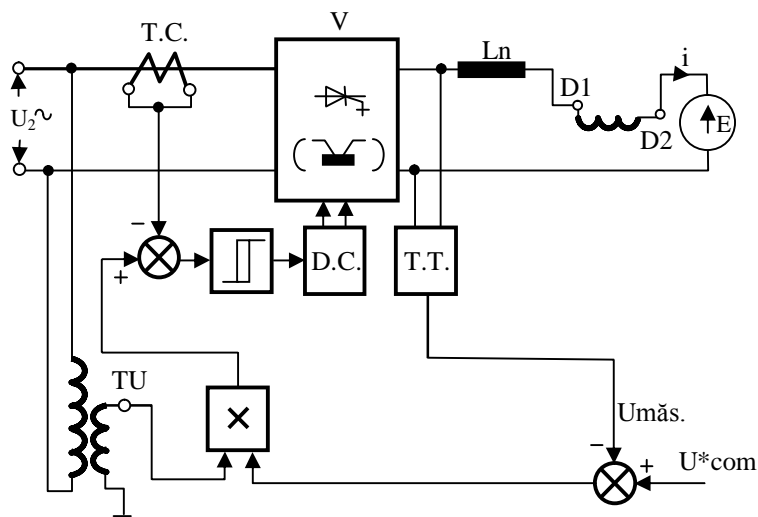


Fig. 6.8 Schema de comandă a unei punți redresoare cu GTO sau cu tranzistoare de putere în vederea obținerii unui factor de putere unitar.

În schema prezentată în fig. 6.8, tensiunea redresată furnizată de traductorul de tensiune T.T este comparată cu o tensiune de comandă ca mărime prescrisă. Eroarea rezultată este înmulțită cu o tensiune sinusoidală, sincronă cu tensiunea rețelei, demultiplicată prin transformatorul T.U. Tensiunea sinusoidală

obținută la ieșirea multiplicatorului, este comparată cu curentul de fază măsurat în secundarul transformatorului de curent T.C. În acest fel se realizează o comandă în curent a redresorului comandat. Curentul de linie este tot timpul în fază cu tensiunea și, deci, rezultă un factor de putere unitar.

În fig. 6.9 se prezintă o schemă de reglare a tensiunii la care tensiunea de comandă a redresorului se calculează cunoscându-se parametri mașinii și măsurându-se viteza. Se compară viteza prescrisă  $\Omega^*$  cu cea măsurată  $\Omega$ , rezultând o eroare proporțională cu cuplul. Prin extragerea de radical rezultă curentul prin indus. Se calculează tensiunea de comandă a redresorului din ecuația:

$$U_d = E + R_M I, \quad (6.23)$$

Unde,  $E = K\Phi\Omega$ , iar  $K\Phi = \text{cu } K_e \text{ și } I$ .

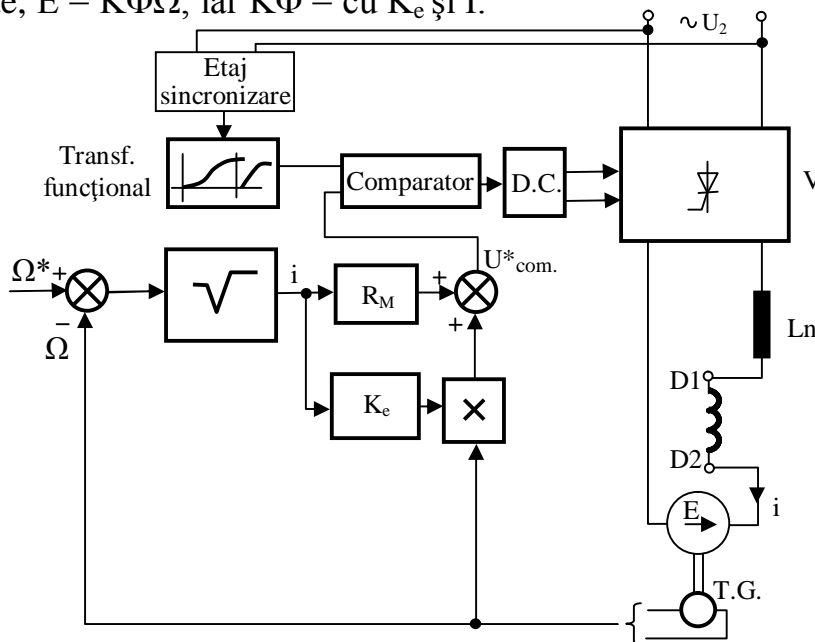


Fig. 6.9. Schema de reglare a tensiunii prin controlul vitezei

Tensiunea electromotoare indusă rezultă ca produs între  $I$ ,  $K_e$  și  $\Omega$ . Apoi adunând la aceasta căderea rezistivă din circuit se obține tensiunea de comandă a redresorului.



În cazul utilizării unui redresor GTO sau cu tranzistoare de putere, pentru a obține și un factor de putere bun, tensiunea de comandă calculată cu schema din fig.5.9 este utilizată ca tensiune de comandă prescrisă în schema din fig.6.8.

O ameliorare a factorului de putere al VEMA se mai poate obține dacă mașinile de tracțiune de c.c. sunt alimentate conform fig.6.10 de la redresoarele monofazate formate din două punți semicomandate înseriate pe partea de c.c. și comandate secvențial, una dintre ele fiind cu comutație naturală, iar cealaltă cu comutație forțată a tiristoarelor, (unghiul de aprindere al acestora fiind  $\alpha$ , iar cel de stingere prin comutație forțată, fiind,  $\pi - \alpha$ ).

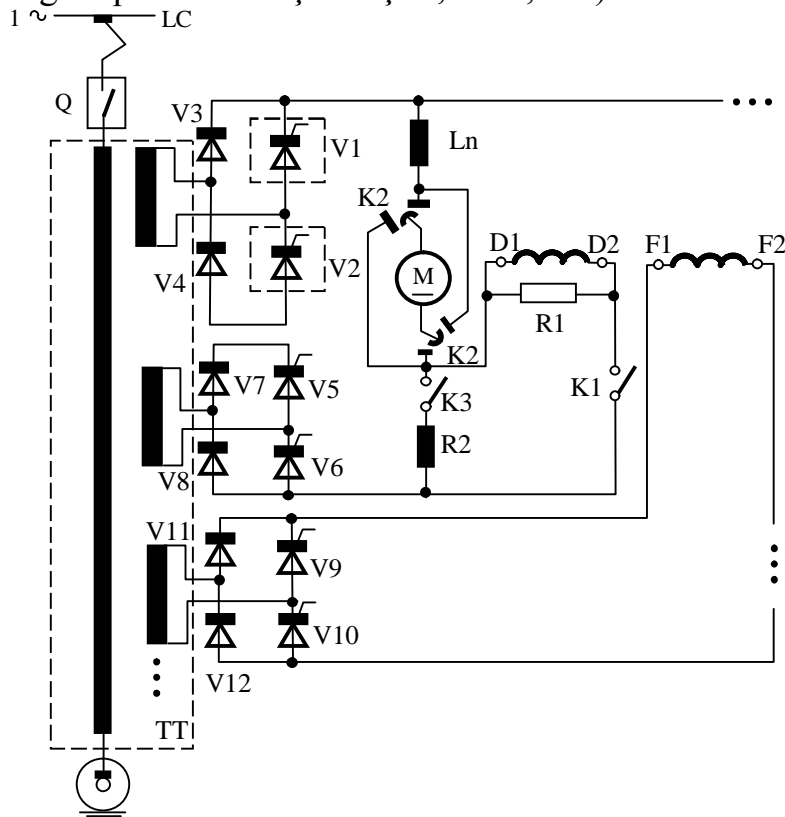


Fig.6.10 Schema parțială a circuitului de forță al unui VEMA cu motoare de tracțiune de c.c. dublu excitate și cu redresoare monofazate formate din două punți semicomandate, una fiind cu comutație forțată.

Prezența circuitelor de comutație forțată aferente tiristoarelor, V1 și V2 ale uneia dintre punțile redresoare este marcată în fig.6.10 prin pătratele cu linii întrerupte din jurul acestor tiristoare.

Motoarele de tracțiune de c.c. ale VEMA din fig. 6.10 sunt dublu excitate, serie și separat, înfășurările de excitație separată fiind toate conectate în serie și alimentate printr-un redresor monofazat distinct, în punte semicomandată (V9 ÷ V12). Reversarea motoarelor de tracțiune se face prin schimbarea polarității înfășurării rotorice cu ajutorul, comutatorului-inversor K2.

În domeniul de la 0 la jumătatea tensiunii nominale a motorului de tracțiune, este activă numai puntea redresoare semicomandată cu comutație forțată ale cărei tiristoare sunt controlate la aprindere ( $\alpha$ ) și la stingere ( $\pi - \alpha$ ), pentru  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , circuitul de tracțiune se închide prin ramura cu diode a punții redresoare inactive.

În domeniul de la jumătate la întreaga tensiune nominală a motorului de tracțiune, ambele punți redresoare semicomandate sunt active, cea cu comutație naturală fiind complet deschisă ( $\alpha = 0$ ), iar cea cu comutație forțată fiind controlată pentru  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ .

### 6.1.2. Regimul de frânare electrică

La VEMA echipate cu motoare de tracțiune electrică de c.c. se regăsesc cele două modalități de frânare electrică, prezentate în cazul VEMC și anume frânarea reostatică și frânarea recuperativă.

În principiu, frânarea reostatică a acestor VEMA decurge la fel ca în c.c. Mașinile de tracțiune de c.c. sunt trecute în regim de

generator, fiind excitate separat, fie de la o baterie de acumuloare, fie de la transformatorul de tracțiune printr-o punte redresoare monofazată distinctă sau, mai simplu, printr-una din punțile redresoare monofazate utilizate în regim de tracțiune (fig.6.11).

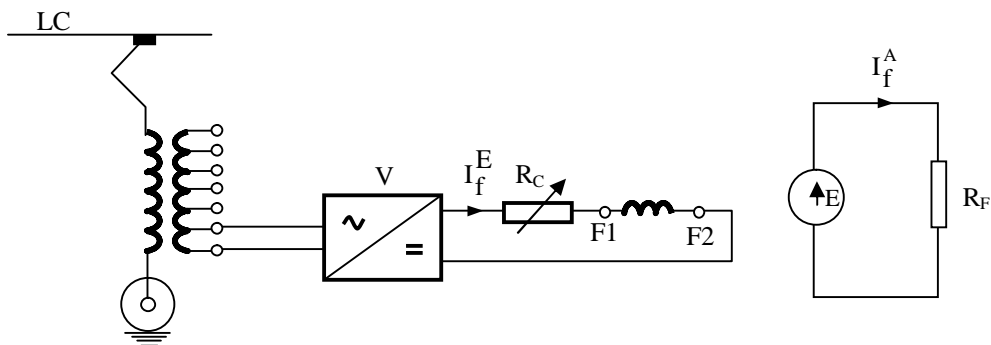


Fig. 6.11. Schema de frânare electrică reostatică a VEMA cu alimentarea separată a înfășurării de excitație a mașinii de tracțiune de c.c.

Deoarece la VEMA nu se folosește reostat de pornire, este necesar să se prevadă rezistoare (cu răcire forțată) numai pentru frânare. Prin circuitul rotoric fiecare mașină de tracțiune de c.c., funcționând ca generator, debitează pe un rezistor de frânare propriu.

La VEMA din fig.6.10, în timpul frânării reostatice, contactorul K3 este închis introducând în circuitul rotoric rezistorul de frânare R2, iar contactorul K1 din circuitul excitației serie este deschis, mașina de tracțiune rămânând numai cu excitație separată. (de la puntea redresoare monofazată, semicomandată V9 ÷ V12).

Reglarea frânării reostatice se face prin variația curentului de excitație al mașinilor de tracțiune de c.c., obținută (ca în regim de tracțiune) prin graduatorul transformatorului de tracțiune, în

cadru punți redresoare necomandate, respectiv, prin control de fază, în cazul punții redresoare semicomandate sau complet comandate.

La VEMA echipate cu mașini de tracțiune de c.c. serie și cu punți redresoare monofazate complet comandate, este posibilă frânarea cu recuperare, mașinile funcționând în regim de generator cu excitație separată.

Pentru a trece în regimul de frânare cu recuperare, trebuie executate următoarele operații:

- alimentarea înfășurării de excitație de la o sursă separată, sensul curentului fiind inversat față de regimul de motor;
- restrângerea domeniului de variație a unghiului de comandă al redresorului, între  $90^0$  și  $180^0$

Schimbând sensul curentului prin înfășurarea de excitație, aceasta duce la schimbarea sensului tensiunii electromotoare induse.

Schema de principiu a frânării recuperative este prezentată în fig. 6.12

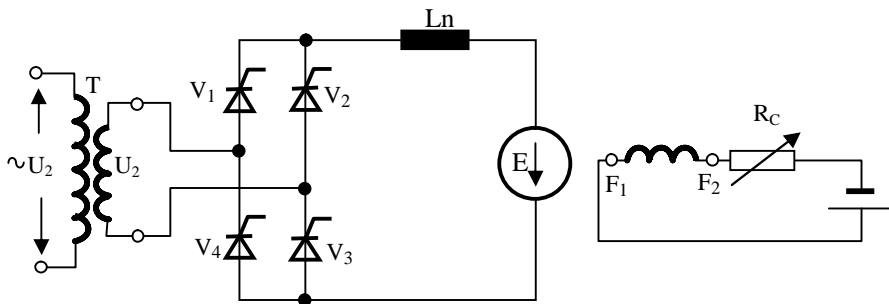


Fig. 6.12 Schema de principiu la frânarea recuperativă.

Menținând curentul de excitație constant și fluxul se menține constant, tensiunea indusă fiind direct proporțională cu viteza.

Tensiunea dată de redresor în regim de invertor este de forma

$$U_i = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \quad (6.24)$$

Curentul prin indus este dat de relația:

$$I = \frac{E - U_i}{R_t}, \quad (6.25)$$

unde,  $R_t$  este rezistența totală din circuit.

Expresia cuplului de frânare este:

$$M_f = K\phi I \quad (6.26)$$

înlocuind (6.24) și (6.25) în (6.26), rezultă:

$$M_f = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{(K\phi)}{R_t} U_2 (\cos \alpha) + \frac{(K\phi)^2}{R_t} \Omega. \quad (6.27)$$

Caracteristicile mecanice în regim de frânare recuperativă sunt prezentate în fig.6.13.

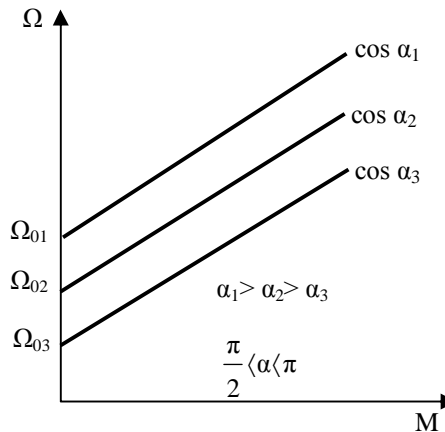


Fig. 6.13 Caracteristicile mecanice la frânarea recuperativă.

Vitezele la care dispare cuplul de frânare se determină din relația 6.27

$$\Omega_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_2}{K\phi} (\cos \alpha) \quad (6.28)$$

pentru a menține cuplul de frânare pe tot timpul frânării la o valoare impusă  $M_f^*$  trebuie modificat unghiul  $\alpha$  în funcție de viteza mașinii, după o relație ce rezultă din (6.27)

$$\alpha = \arccos \frac{(K\phi)\Omega - M_f^* \frac{R_t}{K\phi}}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2} \quad (6.29)$$

În cazul acestei frânări se poate aduce vehiculul până la viteze reduse, iar, în continuare, până la oprire se va utiliza frâna mecanică. De asemenea la această frânare energia recuperată este întotdeauna primită de rețeaua de curent alternativ.

## 6.2. VEMA PROPULSATE CU MAȘINI DE TRACȚIUNE ASINCRONE TRIFAZATE

Linia de contact fiind alimentată în curent alternativ, monofazat, iar motoarele de tracțiune fiind motoare asincrone trifazate, alimentarea acestora se realizează printr-un convertor cu circuit intermediar, care generează un sistem trifazat de tensiuni, de valoare și frecvență variabile. Filtrul din circuitul intermediar de curent continuu determină caracterul sursei inverterului: de tensiune (fig. 6.14a), sau de curent (fig. 6.14b).

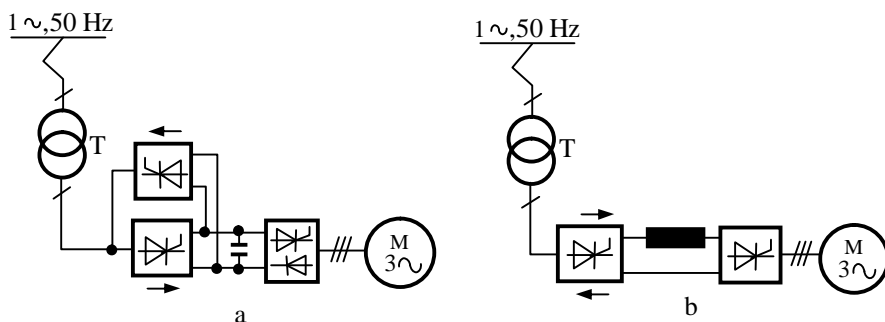


Fig.6.14 Tipuri de invertoare: a - de tensiune; b – de curent.

Astfel, pentru ca circuitul intermediar să aibă caracter de sursă de tensiune este necesar ca filtrul să fie realizat dintr-un condensator de capacitate mare.

Iar pentru ca circuitul intermediar să aibă caracter de sursă de curent, filtrul trebuie să fie o bobină.

VEMA (de tracțiune feroviară) operaționale cu mașini de tracțiune asincrone trifazate cu rotor în colivie, sunt echipate cu CSF cu circuit intermediar de tensiune imprimată.

Convertorul de rețea este o combinație de două punți redresoare monofazate comandate cu comutație forțată, conectate în antiparalel pe partea de c.c., iar convertorul de mașină este un invertor trifazat de tensiune pulsant.

### **6.2.1. Reglarea vitezei mașinilor de tracțiune**

La pornire se asigură creșterea vitezei mașinii asincrone cu menținerea constantă a raportului  $U_1/f_1$ , astfel că fluxul magnetic al mașinii se păstrează nemodificat, figura 6.15.

Însumând frecvența rotorică (sau de alunecare) cu frecvența de rotație, (măsurată) a mașinii asincrone se obține frecvența statorică.

Cu tensiunea de comandă corespunzătoare se generează funcția de comandă a redresorului, de așa manieră încât raportul tensiunii de ieșire și frecvenței să se mențină constant.

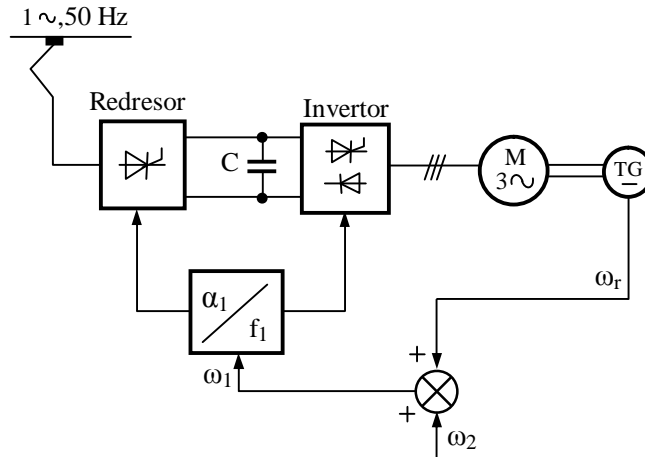


Fig.6.15 Schema de comandă la pornirea și reglarea vitezei cu menținerea raportului  $U_1/f_1$  constant.

După atingerea valorilor nominale ale tensiunii și frecvenței, reglarea vitezei se realizează la tensiune constantă, prin modificarea frecvenței. La creșterea frecvenței are loc micșorarea fluxului în mașină.

Prin menținerea constantă a frecvenței rotorice, caracteristicile mecanice ale mașinii asincrone devin elastice, similare cu cele ale mașinii de c.c. cu excitație serie.

În fig. 6.16 este prezentată o schemă de reglare a vitezei cu menținerea constantă a frecvenței rotorice, iar în fig. 6.16, caracteristica de cuplu în funcție de pulsația statorică.



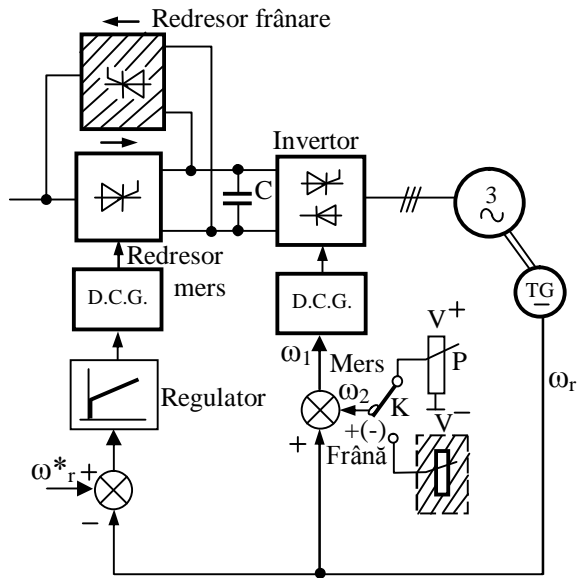


Fig. 6.16 Schema de reglare a vitezei mașinii asincrone, cu menținerea constantă a frecvenței rotorice  $f_2$ .

Exprimând cuplul electromagnetic în funcție de frecvența rotorică  $f_2$ ,

$$M_2 = \frac{3pR_2'U_1^2}{2\pi f_2 \left\{ R_1'^2 + \frac{2R_1'X_2'}{f_2} (np + f_2) + \left[ \frac{R_2'}{f_2^2} + 4\pi^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')^2 \right] (np + f_2)^2 \right\}} \quad (6.30)$$

se constată o dependență de tip hiperbolic între cuplul  $M_e$  și turația  $n$ .

La trecerea comutatorului K (fig. 6.16) pe poziția „frânăre” se prescrie o valoare negativă, a pulsației (frecvenței) rotorice, situație în care mașina asincronă va frâna recuperativ, în regim de generator. Energia de frânare este recuperată printr-un redresor

monofazat conectat în paralel cu cel destinat regimului de tracțiune.

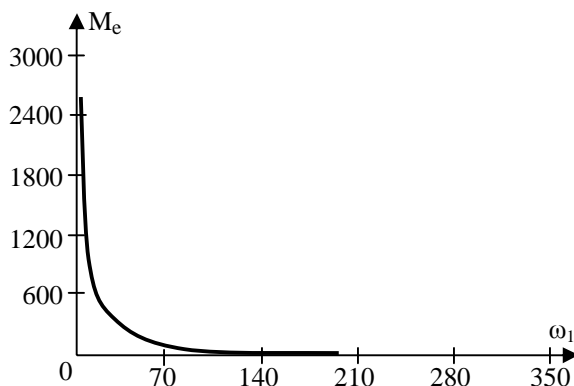


Fig.6.17 Caracteristica cuplului electromagnetic, în funcție de pulsația statorică, la  $f_2 = 2\text{Hz} = \cos nt$ .

În fig. 6.18 se prezintă schema de reglare a vitezei mașinii asincrone cu menținerea constantă a alunecării, iar în fig 6.19 caracteristica de cuplu electromagnetic în funcție de pulsația statorică.

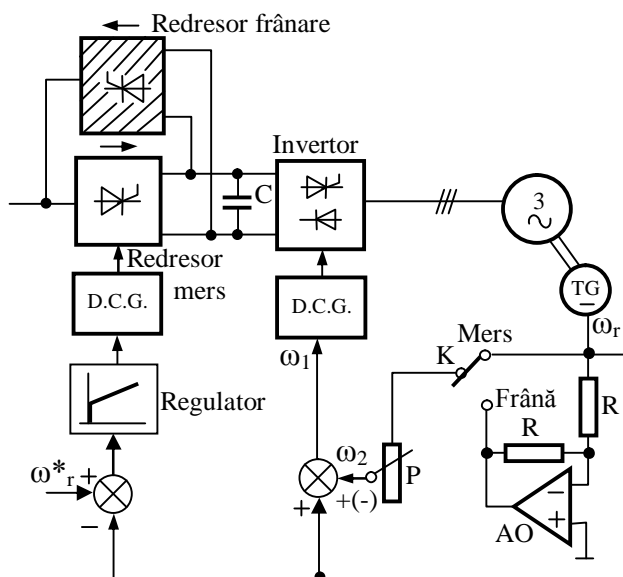


Fig.6.18. Schema de reglare a vitezei mașinii asincrone cu menținerea constantă a alunecării

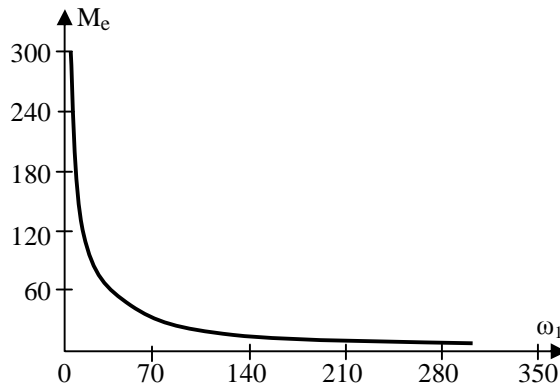


Fig.6.19 Caracteristica cuplului electromagnetic în funcție de pulsația statorică, la alunecare constantă.

Menținerea constantă a alunecării se obține, dacă se creează proporționalitatea :

$$\omega_2 = k \omega_r \quad (6.31)$$

între pulsația rotorică (sau de alunecare)  $\omega_2$  și pulsația electrică de rotație a mașinii  $\omega_r$  (măsurată cu tahogeneratorul TG).

Stabilirea constantei de proporționalitate  $k$  se face din potențiometrul F (fig.6.18).

Din relația (6.31) rezultă pentru alunecare expresia:

$$a = \omega_2 / \omega_1 = \omega_2 / (\omega_2 + \omega_1) = k / (k + 1) \quad (6.32)$$

Ținând seama de (6.31), (6.32) ecuația caracteristicii mecanice a mașinii asincrone, în acest caz, se poate scrie,

$$M_e = \frac{3pR_2U_1^2}{k\omega_r \left\{ \left[ R_1 + (k+1)R_2/k \right]^2 + \omega_r^2 (k+1)^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2 \right\}}. \quad (6.33)$$

## **CAPITOLUL 7**

# **TRACȚIUNEA ELECTRICĂ PRIN CABLU**

## INTRODUCERE

Sistemul de tracțiune electrică prin cablu este alcătuit în principiu din vehicule electrice pasive (cabine, scaune, bene etc.) deplasate la înălțimi considerabile prin intermediul unor cabluri de oțel acționate electric dintr-o stație motoare; vehiculele electrice pasive sunt suspendate prin cărucioarele ce rulează pe cabluri purtătoare întinse, pe piloni (metalici sau din beton armat).

Ca o clasificare, după destinația lor, sistemele de tracțiune electrică prin cabluri se împart în două categorii *teleferice* (pentru transportul de persoane) și *funiculare* (pentru transportul de materiale).

Telefericul, față de alte sisteme de transport posedă, pe de o parte, avantajele fiabilității mărite, posibilități de automatizare completă, securitate maximă pentru călători, insensibilitate la vânt, iar, pe de altă parte, dezavantajele investițiilor importante, determinate de construcții – montaj și de puterea instalată, durata mare de amortizare, debitul relativ scăzut, (uzual sub 2000 persoane/h).

Unele caracteristicile tehnice ale unui teleferic sunt limitate, de exemplu : viteza maximă admisă de 2,5 m/s la cabinele cu însoțitor și 4m / secundă la cele fără însoțitor, înălțimea minimă a cabinelor față de sol 5 m, înălțimea maximă 100 m la telefericele care nu dispun de cabină de salvare și nelimitată la cele dotate cu o astfel de cabină, accelerația maximă,  $1,5\text{m/s}^2$ , decelerație maxima  $1,25\text{m/s}^2$ .

În figura 7.1 se prezintă schema de principiu a unui teleferic, prevăzut cu două cabine aflate în mișcare alternativă și

simetrică, se evidențiază următoarele elemente componente:

- cabluri purtătoare 1 dispuse pe pilonii (stâlpii 11, ancorate 6 în stația motoare și tensionate în stația de întoarcere prin contragreutățile 4);

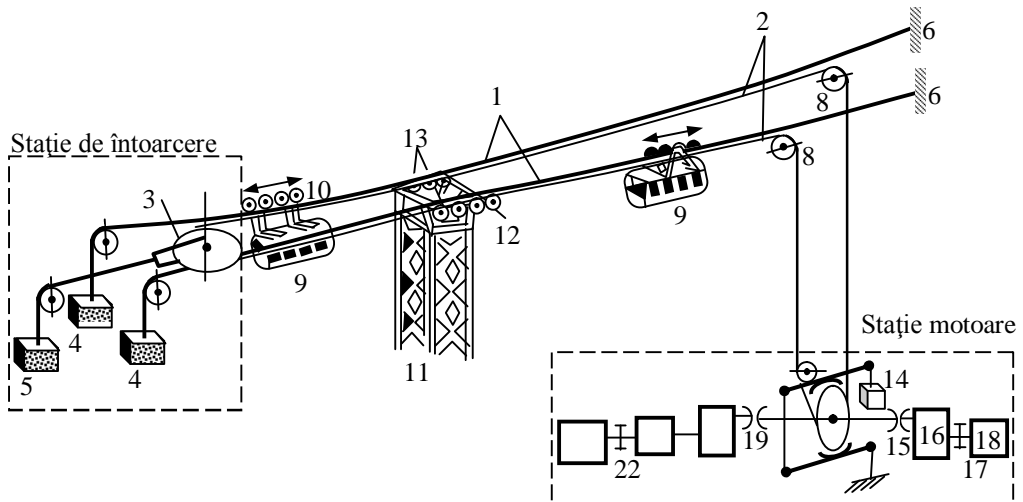


Figura 7.1 Schema de principiu a unui sistem de tracțiune electrică prin cablu (teleferic).

- cablul de tracțiune 2 care asigură deplasarea cabinelor și care servește, totodată, pentru transmiterea comunicațiilor telefonice și a semnalelor de telecomandă între cabine, pe de o parte, respectiv între cabine și stația motoare, pe de altă parte;

- instalațiile fixe destinate susținerii și menținerii în poziție a cablurilor, adică pilonii 11 (cu o înălțime de până la 80 m pe care sunt întinse cabluri purtătoare și de tracțiune), saboții 13 (care susțin cablurile purtătoare permițând ușor deplasări longitudinale), rolele de ghidare tip galeți 12 (care susțin cablul de tracțiune atât în mișcare cât și în repaus);

- cabinele 9 acționate de cablul de tracțiune și susținute prin cărucioarele 10 pe cablurile purtătoare;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- stația motoare, care cuprinde toate dispozitivele de antrenare și de frânare ale cablului de acționare precum și comenzile de mers și de semnalizare grupate în postul de comandă; aceasta din urmă conține și aparate indicatoare permițând cunoașterea exactă în orice moment a poziției și vitezei cabinelor; motorul electric principal 18 asigură tracțiunea în exploatare normală putând fi alimentat fie de la rețeaua electroenergetică generală, fie de la un grup electrogen; reductorul 16 transmite cuplul și adaptează viteza motorului la roata motoare 7; cuplajul 15 asigură legătura mecanică între reductor și roata motoare; aceasta din urmă este prevăzută cu garnituri de cauciuc pentru mărirea aderenței și transmite mișcarea la cablul de tracțiune; diametrul ei poate fi cuprins între 2,5 și 4 metri. Este obligatorie dotarea stației motoare cu două frâne distincte: (1) frâna de serviciu 17 care acționează pe arborele motor în funcționare normală numai pentru imobilizare la oprire (reducerea vitezei și oprirea făcându-se pe cale electrică cu ajutorul motorului). Această frână acționează și la pierderea motorului electric de tracțiune; (2) frâna de siguranță 14, acționează direct asupra roții motoare, în cazul depășirii cu peste 10 % a vitezei maxime utilizate în serviciul normal; (mai există și frâna de cărucior care se află în compunerea fiecăruia din cărucioarele 10 și care acționează asupra cablului purtător, în mod automat, la dispariția efortului de tracțiune sau ca urmare a declanșării ei de către însoțitorul de cabină); motorul de rezerva 23 este obligatoriu, fiind, în general, un motor termic (diesel), care intervine la apariția unui defect pe lanțul principal de acționare; lanțul său auxiliar mai conține o frână pe arborele motor 22, un inversor de sens 21, un reductor 20 și un cuplaj 19;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- stația de întoarcere care conține roata 3 pentru inversarea sensului de mișcare a cablului de tracțiune și contragreutățile pentru tensionarea cablului de tracțiune 5, respectiv cablurilor purtătoare 4. La teleferice forța de tracțiune este așadar produsă de motorul electric principal transmisă roții motoare prin reductor și este de la acesta, furnizată cablului de tracțiune care acționează cabinele asigurându-le deplasarea.

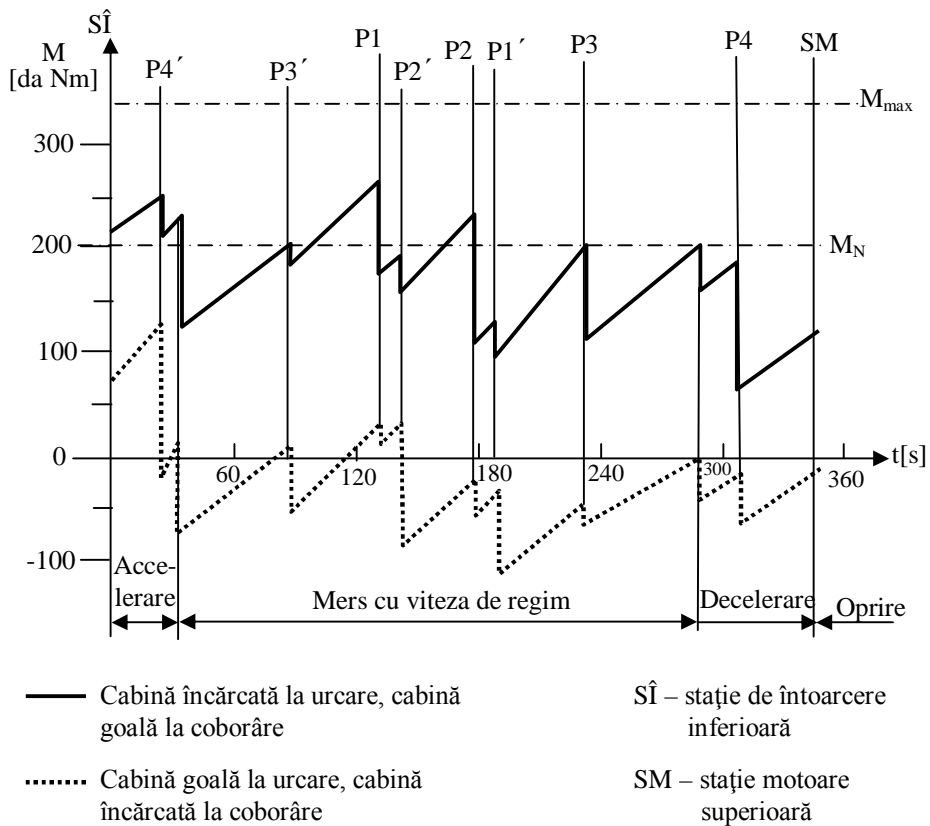


Figura 7.2 Diagrama cuplurilor în funcție de timp la un teleferic  
(cu patru piloni intermediari de susținere)

Puterile aferente telefericelor fiind tot mai mari, prezintă deosebită importanță determinarea exactă a puterii motorului electric principal de tracțiune în funcție de profilul și lungimea traseului,



greutatea cabinelor goale și încărcate, efortul de rulare al cablului de tracțiune, greutatea maselor în mișcare . Toate aceste informații permit trasarea diagramei cuplurilor exemplificată în figura 7.2 pentru un teleferic comportând patru piloni intermediari de susținere. Se pot observa variațiile bruște de cuplu la trecerea cabinelor prin dreptul pilonilor, și la începutul, respectiv, sfârșitul parcursului, când au loc accelerări și decelerări. Cuplurile efectiv utilizate în exploatare se vor găsi între cele două situații limită trasate pe diagrama, (a) cabină plină la urcare și goală la coborâre (cazul cel mai defavorabil ), (b) cabină goală la urcare și plină la coborâre.

Cuplul mediu se calculează cu relația:

$$\tilde{M} = \left( \int_0^T M^2 dt / T \right)^{1/2} \quad (7.1)$$

unde, T este durata minimă a unui ciclu (aceasta conținând și timpul de îmbarcare și de debarcare ) durata de închidere și deschidere a ușilor cabinei, precum și timpul necesar schimbului de semnale de siguranță. Valoarea cuplului mediu servește la determinarea puterii nominale a motorului electric principal de tracțiune. Se verifică deasemenea, dacă cuplul maxim permite demarajul și accelerarea în punctul cel mai defavorabil al traseului cu încărcătură maximă.

Creșterea vitezelor de mers și a capacității cabinelor în vederea obținerii unui debit sporit, implică utilizarea unor sisteme de acționare electrică a telefericelor capabile să asigure modificarea progresivă și fără șocuri a vitezei, independent de variațiile sarcinii.

Primele teleferice, de mică putere, au fost acționate cu motoare asincrone cu colivie, frânarea și oprirea efectuându-se

manual. S-a trecut, apoi, rapid la motoarele asincrone cu inele, la care cuplul se poate modifica ușor prin variația rezistenței rotorice. Rezultate superioare s-au obținut alimentând aceste motoare de la variator de tensiune alternativă, format din perechi de tiristoare în antiparalel (T1T4, T3T6, T2T5, figura 7.3.).

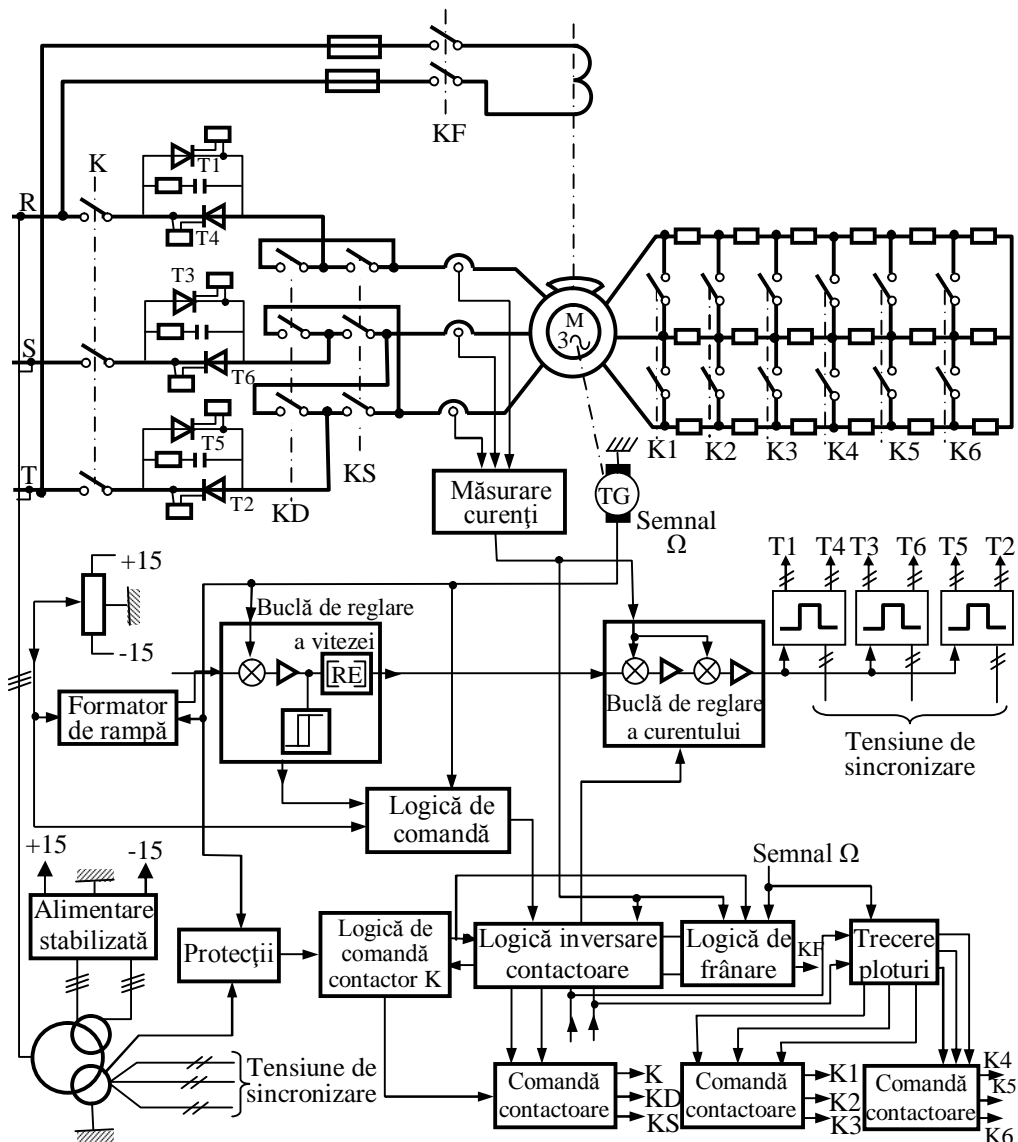


Figura 7.3. Schema funcțională a sistemului de acționare electrică a telefericului cu motor asincron cu inele.

Schimbarea sensului de rotație se face cu ajutorul contactoarelor (KD, KS), iar frânarea se realizează modificând rezistența rotorică prin acțiunea contactoarelor (K1, ..., K6). Acest sistem de acționare electrică se pretează foarte bine automatizării, dar este dezavantajos la funcționarea prelungită în plină putere, la viteză intermediară.

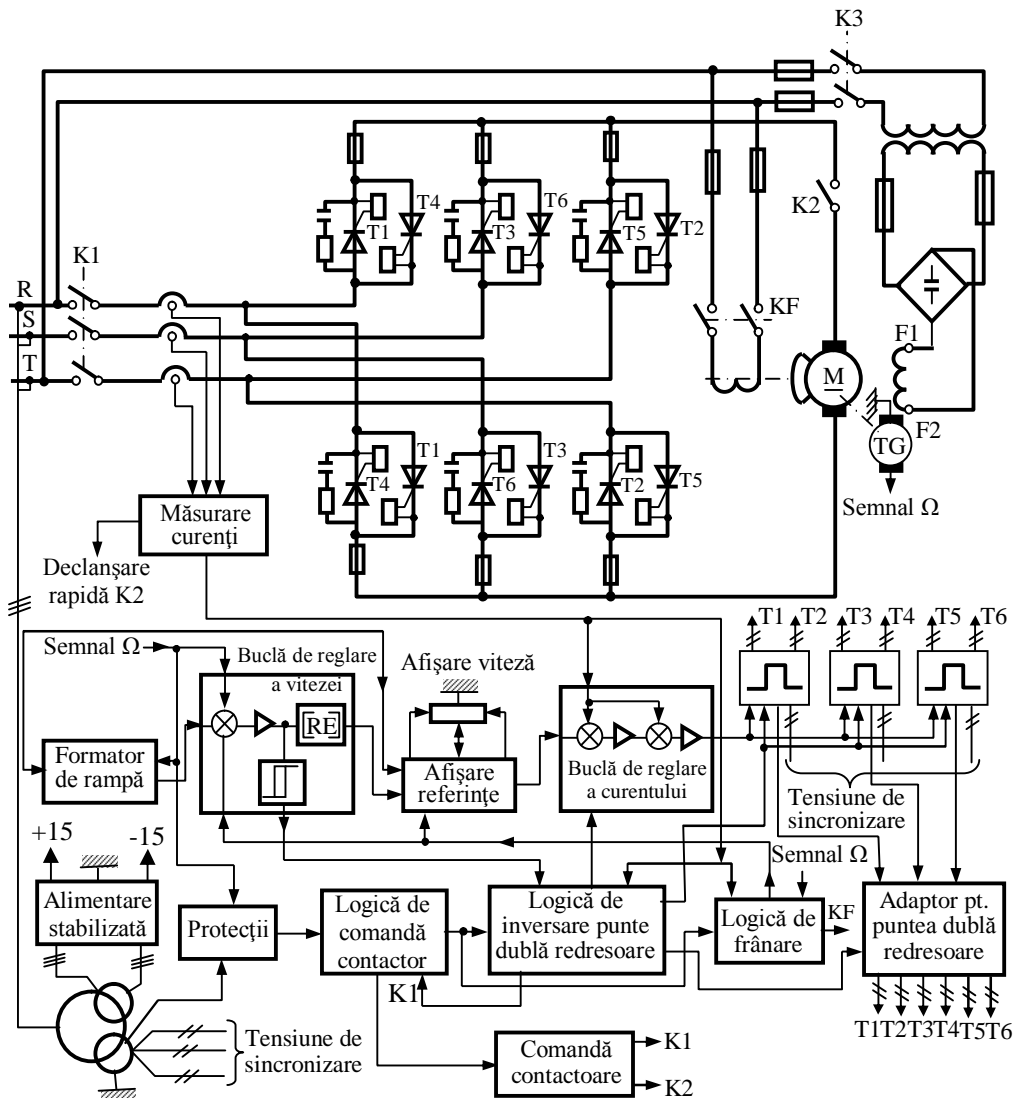


Figura 7.4. Schema funcțională a sistemului de acționare electrică a telefericului cu motor de c.c., cu excitație separată.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Telefericele actuale sunt acționate, preponderent, cu motor de tracțiune de c.c. În figura 7.4 este prezentată schema funcțională a unui sistem de acționare, complet automatizat, cu motor de c.c. cu excitație separată, alimentat în indus printr-o punte dublă redresoare, comportând tiristoare montate în antiparalel.

Această soluție permite reversarea motorului de tracțiune în în timpi de ordinul zecilor de milisecunde.

**CAPITOLUL 8**

**VEHICULE ELECTROMOTOARE  
AUTONOME**

## 8.1. LOCOMOTIVE DIESEL – ELECTRICE

Datorită inconvenientelor sale, prezentate în continuare, motorul diesel „solo” nu este utilizat în tracțiune : (1) absența cuplului de pornire (2) caracteristica mecanică rigidă, neasigurând autoadaptarea la sarcinile variabile ale tracțiunii; (3) instabilitatea de la o anumită turație  $n_k$  (figura 8.1); (4) domeniul restrâns de reglare a vitezei; (5) capacitatea limitată de supraîncărcare; (6) imposibilitatea inversării sensului de rotație; (7) putere maximă dezvoltată numai la viteza maximă.

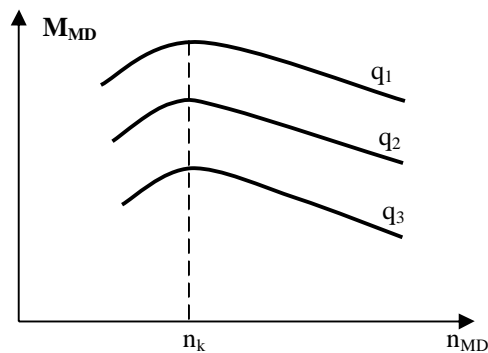


Figura 8.1. Caracteristicile mecanice pentru motorul diesel cu diferite grade de injecție  $q$ .

Transmisia electrică a puterii mecanice rezolvă aceste neajunsuri conducând la tracțiunea – diesel în una din cele trei variante operaționale .

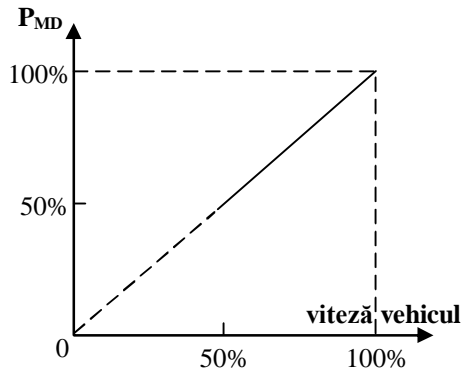


Figura 8.2. Diagrama puterii motorului diesel de tracțiune

### 8.1.1. Locomotive diesel-electrice de c.c.

Locomotiva diesel-electrică cu transmisie electrică de c.c. utilizează un generator (G) de c.c. care alimentează motoarele electrice de tracțiune (MET) de c.c. de excitație serie.

Puterea generatorului  $P_G$  se poate exprima fie în funcție de puterea efectivă a motorului diesel  $P_{MD}$ , fie în funcție de tensiunea generatorului și de curentul debitat, prin relația:

$$P_G = \beta \cdot \eta_G \cdot P_{MD} = 10^{-3} U_G \cdot I_G \quad / kW /, \quad (8.1)$$

în care  $\beta = 0,91 \div 0,95$ , ținând seama de consumul auxiliar de putere și  $\eta_G$  este randamentul generatorului.

Puterea la arborele motorului de tracțiune  $P_M$  rezultă:

$$P_M = \frac{\beta \cdot P_{MD} \cdot \eta_G \cdot \eta_M}{N_M} = \frac{U_M \cdot I_M \cdot \eta_M}{1000} \quad / kW / \quad (8.2)$$

în care  $N_M$  este numărul motoarelor electrice de tracțiune,  $\eta_M$  este randamentul motorului de tracțiune iar  $U_M$  și  $I_M$  tensiunea aplicată

respectiv curentul absorbit de motor. Forța de tracțiune dezvoltată se poate exprima prin relația :

$$F_0 = N_M U_M \cdot I_M \eta_M \cdot \eta_{TM} / v \quad / N / \quad (8.3)$$

în care  $\eta_{TM}$  reprezintă randamentul transmisiei mecanice.

Relația (8.1) arată că pentru o anumită putere a motorului diesel realizat la un anumit grad de injecție  $q$  și o anumită turație, generatorul de c.c. dezvoltă o putere constantă, dacă are o caracteristica externă  $U_G = f(I_G)$  cu o variație hiperbolică. Acest fapt asigură și pentru caracteristica mecanică de tracțiune o alură hiperbolică.

Pentru exemplificare, în figura 8.3 se prezintă schema de principiu a locomotivei, diesel–electrice românești, 060 DA de 2400 CP, echipată cu un motor diesel de 2300 CP cu 12 cilindri. Locomotiva este de tip  $C^0 - C^0$ .

Generatorul principal  $G_p$  (figura 8.3) este de c.c., având tensiunea maximă de 890 V și curentul maxim de 3900 A, posedă trei înfășurări de excitație.

Înfășurarea de excitație separată  $Ex_{G1}$  constituie excitația de bază a generatorului principal fiind alimentată de la generatorul auxiliar  $G_a$  cu o tensiune constantă de 170 V și un curent variabil între  $21 \div 28$  A.

Regulatorul rapid de sarcină RRS și regulatorul automat de sarcină RAS realizează menținerea constantă a tensiunii de 170 V la bornele generatorului auxiliar, indiferent de sarcina și turația acestuia.

Rezistența R14, înseriată cu excitația separată la pornire este scurtcircuitată în regim de mers de contactorul electromagnetic K170.



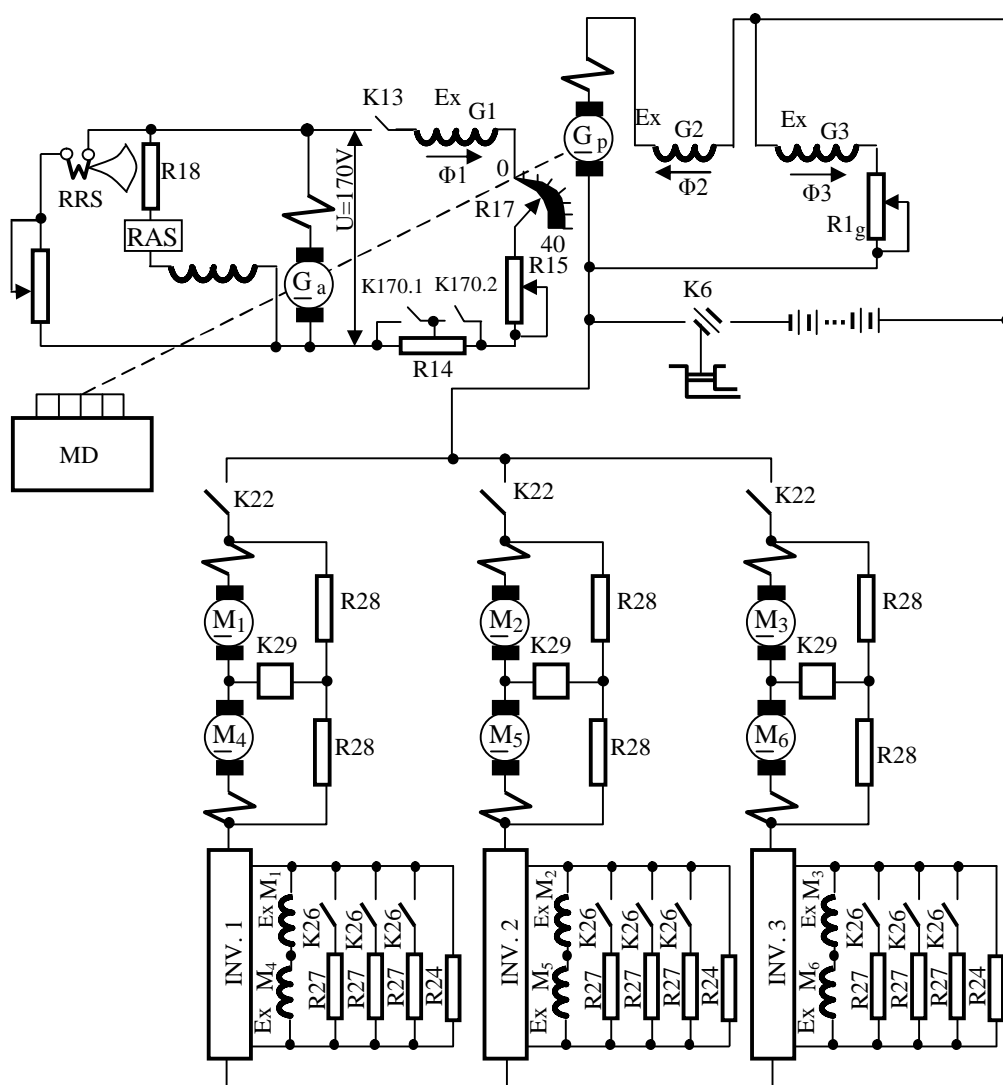


Figura 8.3 Schema locomotivei diesel – electrice de c.c.  
(tip 060 - DA). Circuitele de forță și de reglare

Rezistența R15 se introduce în circuitul excitației separate numai când din cauza unei defecțiuni la un motor de tracțiune se izolează grupa de două motoare din care face parte motorul defect, fiind necesară reducerea puterii generatorului principal.

Grupul de rezistențe R17 introdus în circuit cu ajutorul regulatorului de câmp asigură reglajul automat al puterii generatorului principal. Prin reglarea rezistențelor R17 în 40 trepte se obține o familie de caracteristici  $U_D = f(i_D)$  (figura 8.5). Generatorul principal funcționează pe caracteristica, în care la momentul respectiv se intersectează cu caracteristica motorului diesel. Regulatorul de câmp este comandat de către regulatorul mecanic al motorului diesel. La curenți mici de sarcină când puterea debitată de generatorul principal este inferioară puterii motorului diesel, generatorul principal funcționează pe porțiunea AB a caracteristicii externe cu limitarea tensiunii la valoarea  $U_{G,max.} = 180V$ , asigurată de rezistența R1g. pe această porțiune rezistența R17, se găsește pe poziția „0”, care determină un curent maxim de excitație separată de 28 A. Atunci când curentul de sarcină crește peste valoarea  $I_B$ , puterea generatorului principal devine superioară puterii motorului diesel, ceea ce determină intrarea în funcțiune a regulatorului de câmp, care se va fixa pe una dintre cele 40 de poziții corespunzătoare egalității puterilor generatorului principal și motorului diesel.

La pornire, un interval de maxim 5 minute, generatorul lucrează pe porțiunea CD a caracteristicii externe curentul fiind limitat la 4000 de A. Înfășurarea de excitație serie  $Ex_{G2}$  este de tip diferențial și asigură generatorului principal caracteristici externe puternic căzătoare.

Înfășurarea de excitație derivație  $Ex_{G3}$  produce un flux în același sens cu fluxul propriu excitației separate. Rezistența R1g limitează tensiunea maximă a generatorului principal la o valoare maximă impusă de colectorul generatorului.

Generatorul principal mai este prevăzut cu poli auxiliari și înfășurare de compensație.

De la bornele generatorului principal sunt alimentate cele 6 motoare de tracțiune M1, ...M6, grupate în serie câte două aparținând boghiurilor diferite. Sunt motoare de c.c. de 2000 kW cu excitație serie, cu tensiunea 460V și curent maxim 1350 A. Motoarele sunt conectate prin contactoarele electropneumatice K22, în paralel cu indusul fiecărui motor se găsește câte o rezistență R28, care formează împreună cu indusul o punte: în diagonala punții se află releul antipatinaj K29 care comandă blocarea creșterii tensiunii generatorului principal și frâna mecanică în cazul apariției patinării la una dintre perechile de roți motoare.

Înfășurările de excitație ( $E_{xM1}$ , ....  $E_{xM6}$ ) ale motoarelor de tracțiune sunt conectate două câte două în serie. Rezistența de protecție R14 șuntează permanent înfășurările de excitație. Schimbarea sensului de mers se realizează cu ajutorul inversoarelor INV.1 ....INV.3 prin schimbarea sensului curentului în excitația motoarelor de tracțiune. Tot cu ajutorul inversorului este posibilă izolarea unei grupe de motoare.

Modificarea vitezei se realizează prin:

- modificarea tensiunii de alimentare a generatorului principal:

- modificarea fluxului de excitație al motoarelor de tracțiune în trei trepte prin șuntarea motoarelor cu ajutorul rezistențelor R27, conectate prin contactoarele electromagnetice K26 comandate de către regulatorul de câmp în momentul în care se atinge tensiunea maximă pe generatorul principal.

Circuitul serviciilor auxiliare de pe locomotiva 060- DA se compune din: generatorul auxiliar regulatorul de sarcină al generatorului auxiliar, bateriile de acumatoare cu circuitul de încărcare, circuitul de alimentare al motoarelor din serviciile auxiliare și instalația de măsurare a vitezei locomotivei.

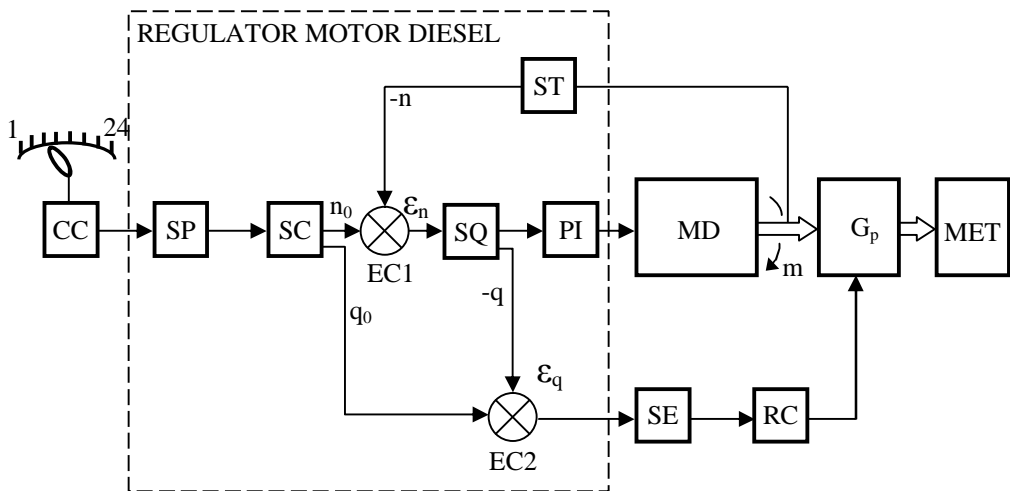


Figura 8.4 Sistemul de reglare automată pentru locomotiva diesel-electrice de c.c. (tip 0,60) DA.

Sistemul de comandă și reglare automată aplicat locomotivei 060-DA, figura 8.4. este realizat pe principiul utilizării complete a puterii motorului diesel pe zona VC a caracteristicii (figura 8.5).

Comanda pornirii și mersul locomotivei se face de către un controler de comandă C:C cu 24 poziții. Pentru o anumită poziție a manetei controlerului comanda de putere se transmite, prin servomecanismul pneumatic SP și prin servomecanismul de comandă al turației și injectiilor SC, elementului de comparație EC 1, sub forma semnalului de turație comandată  $n_0$ , turația reală

n este realizată de servoregulatorul de turație centrifugal ST acționat de arborele motorului diesel.

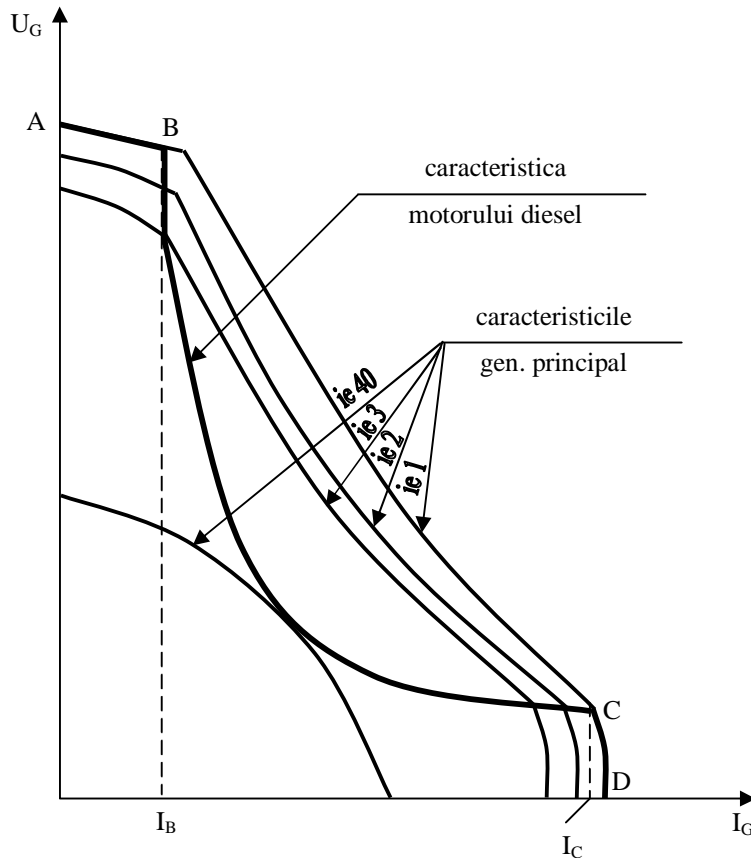


Figura 8.5. Caracteristicile externe ale generatorului principal pentru locomotiva diesel – electrica de c.c.

Eroarea de turație  $\varepsilon_n$  comandă servomecanismul de injecție SQ care amplifică acest semnal și acționează pompa de injecție PI. Prin modificare injecției motorului diesel se modifică atât cuplul motor cât și turația motorului diesel la valoarea comandată  $n_0$ . Din acest moment eroarea de turație anulându-se, servomecanismul de injecție SQ își încetează mișcarea. Dacă la un moment dat rezistența la înaintare a vehiculului se modifică, se schimbă și

cuplul rezistent și pentru a nu se reduce viteza de circulație este necesară modificarea cuplului motor. Cum cuplul motor este determinat de curentul debitat de generatorul principal modificarea sa atrage după sine și modificarea corespunzătoare a puterii generatorului principal și, deci, a puterii și a cuplului motorului diesel. Puterea motorului diesel se menține constantă prin modificarea corespunzătoare a excitației, separate a generatorului principal. Pentru aceasta, injecția comandată  $q_0$  este comparată cu injecția reală  $Q$  în elementul de comparație EC2, iar eroarea de injecție  $\varepsilon_q$  comandă prin intermediul servomecanismului de excitație SE și al regulatorului de câmp RC, rezistența R17 pe una din cele 40 de poziții ale sale determinând modificarea tensiunii la bornele generatorului principal. Procesul de reglare se încheie atunci când ambele erori  $\varepsilon_n$ ,  $\varepsilon_q$  se anulează. Din motive constructive și funcționale puterea motorului pentru primele trei poziții ale controlerului nu se schimbă, modificându-se numai cuplul. Acest lucru se realizează cu ajutorul rezistențelor R14 conectate în serie cu excitația separată a generatorului principal. În poziția doua a manetei de comandă se scurtcircuitează prima rezistență iar în poziția a treia se scurtcircuitează și cea de-a doua.

Pentru poziția a patra, servomecanismul SC acționează și asupra servomecanismului de excitație SR, pregătindu-l pentru reglarea autonomă a excitației.

### **8.1.2. Locomotive diesel – electrice de c.a. - c.c.**

Prin înlocuirea generatorului de curent continuu cu un generator sincron, care alimentează motoarele electrice de

tracțiune prin intermediul unei punți redresoare se obține transmisia electrică de c.a. - c.c. Ca și la locomotiva diesel electrică de c.c. grupul motor generator funcționează în condiții de putere constantă.

Pentru exemplificare, în figura 8.6 se prezintă schema de principiu a locomotivei diesel-electrice românești de 4000 CP, echipată cu un motor diesel de 4000 CP cu 16 cilindri în V. locomotiva este de tip C<sub>0</sub> - C<sub>0</sub>'.

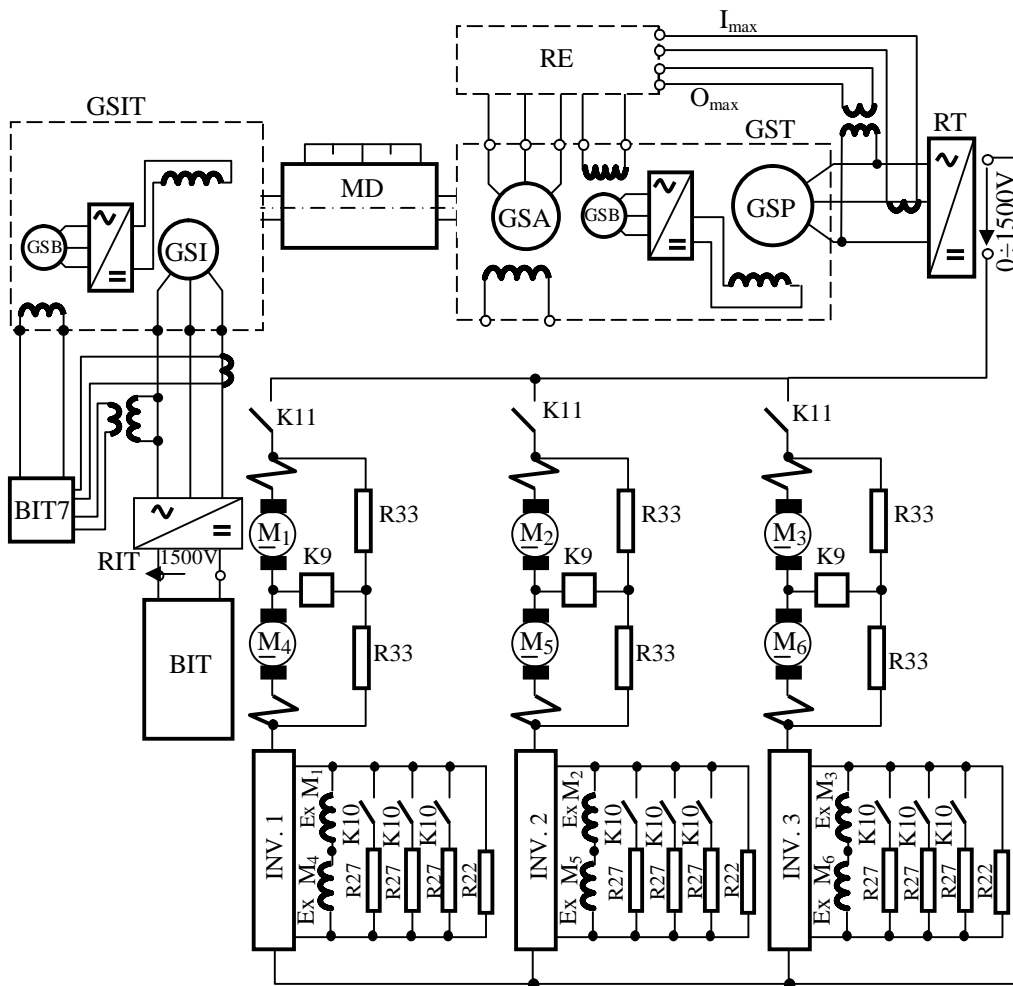


Figura 8.6 Locomotiva diesel-electrică de c.a. - c.c.

Schema circuitului de forță

*Grupul sincron de tracțiune GST* se compune din:

- generatorul sincron principal;
- excitatoarea GSB pentru generatorul principal;
- generatorul sincron auxiliar GSA;

toate cele trei generatoare sincron, formează un ansamblu montat pe axul motorului diesel. Generatorul sincron principal are doisprezece perechi de poli, curent maxim 3900 A și o tensiune, după redresare, de 1500 V. Excitația excitatoarei se alimentează prin intermediul regulatorului de excitație RE de la generatorul sincron auxiliar care produce, după redresare, o tensiune de 110 V c.c. , tensiunea produsă de excitatoare este redresată și alimentează excitația generatorului sincron principal.

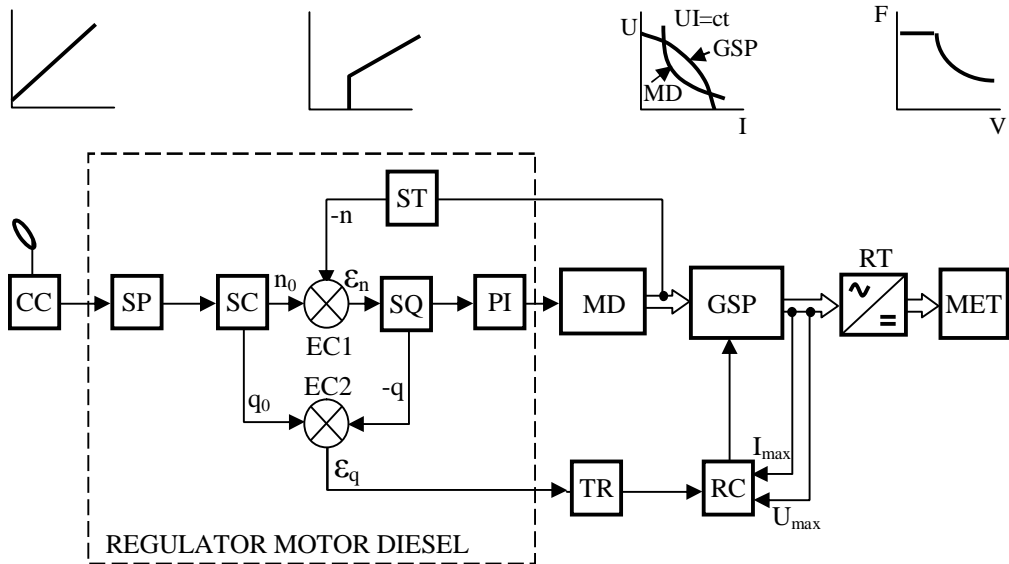


Figura 8.7. Sistemul de reglare automată al locomotivei diesel – electrice de c.a. - c.c.

Prin acțiunea combinată a regulatorului motorului diesel și a regulatorului de excitație RE se asigură funcționarea la putere



constantă atât a motorului diesel cât și a generatorului, punctul de funcționare fiind la intersecția caracteristicii motorului diesel cu a generatorului sincron principal. (figura 8.7)

Controlerul de comandă CC prin intermediul servomecanismului pneumatic SP, comandă mecanismul de comandă, injecție și turație SC care impune motorului diesel o turație prescrisă  $n_0$  și un grad de injecție  $q_0$  (deci o putere parțială  $P_0$ ). Puterea parțială a motorului diesel se reglează continuu până la valoarea nominală  $P_N$ , după stabilirea puterii comandate prin  $n_0$  și  $q_0$ , orice abatere introdusă în sistem de către cuplul rezistent este sesizată de servoregulatorul centrifugal de turație ST și prin regulatorul mecanic, se acționează asupra servomecanismului de injecție SQ. Servomecanismul de injecție comandă, pe de-o parte pompele de injecție PI pentru anularea erorii  $\varepsilon_n = n_0 - n$ , iar pe de altă parte traductorul rezistiv TR care prin intermediul regulatorului de câmp RC stabilește nivelul de excitație al generatorului sincron principal. Regulatorul de câmp introduce și limitările de tensiune la valorile  $U_{\max} = 1500V$  c.c., respectiv de curent la valoarea  $I_{\max} = 3900$  A.

*Redresorul de tracțiune* este un redresor în punte trifazată format din 84 diode TU 38 având un curent maxim de 4200 A și tensiune inversă de 2000V.

*Motoarele de tracțiune* sunt motoare de tip serie, având puterea de 375 KW curentul nominal 820 A tensiunea nominală 500V și turația nominală 2400 rot/min. Conectarea grupelor de motoare în circuit se realizează prin trei contactoare electropneumatice K11. Schimbarea sensului de mers se realizează prin cele trei inversoare de sens INV.1,...,3, montate în circuitul de excitație al motoarelor. Inversorul de sens permite și

izolarea unei grupe de motoare în caz de defect. Pentru protecția excitației motoarelor contra curenților de autoinducție sunt prevăzute rezistențele R 22.

Turația motoarelor de tracțiune se modifică prin:

- tensiunea de alimentare între limitele 0÷750 V;
- subexcitarea motoarelor de tracțiune în trei etape prin rezistențele R27 conectate prin contactoarele electropneumatice K10, comandate de un releu maximal de tensiune în momentul când tensiunea pe motor a atins valoarea maximă de 750 V.

*Grupul sincron de încălzire tren GSIT* este alcătuit din:

- (i) generatorul sincron de încălzire;
- (ii) excitatoarea generatorului de încălzire, GSB

ambele mașini fiind montate pe axul motorului diesel. Excitația excitatoarei este alimentată prin intermediul regulatorului de tensiune BIT7. Acest regulator este un VTC, care comandă curentul în înfășurarea de excitație a excitatoarei generatorului de încălzire tren, astfel încât să mențină constantă tensiunea la valoarea 1500 V c.c.

*Redresorul pentru încălzire tren RIT* este conectat la bornele generatorului de încălzire tren. Este un redresor în punte trifazat, format din 24 diode TU 38 montate în același bloc cu redresorul de tracțiune RT. Tensiunea redresorului este de 1500 V c.c., curentul 500 A și tensiunea inversă 2000V. Circuitul de încălzire al trenului este alimentat de la blocul BIT, calea de întoarcere a curentului fiind șina metalică a CR.

### 8.1.3. Locomotive diesel-electrice de c.a.

În cazul înlocuirii motorului de curent continuu cu motorul asincron obținem importante avantaje: robustețe, simplitate, sporirea siguranței în exploatare.

În figura 8.8 este prezentată schema de principiu a locomotivei diesel-electrice C<sub>0</sub> - C<sub>0</sub> de 3000 CP, cu motoare asincrone.

Motorul asincron este alimentat de la un convertor static de frecvență cu circuit intermediar de tensiune continuă constantă, cu inverterul funcționând pe principiul modulației în durată a impulsurilor după o lege sinusoidală.

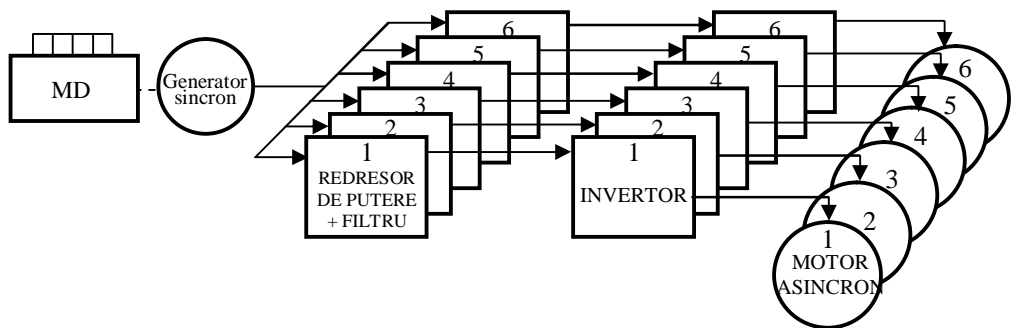


Figura 8.8. Locomotivă diesel-electrică de c.a.  
Schema de principiu

Inverterul asigură funcționarea motorului asincron în domeniul de frecvență 0,4÷125 Hz. Prin folosirea unui număr de șase convertoare cuplate în paralel este posibilă funcționarea cu un bloc unic de comandă.

Schimbarea sensului de mișcare se realizează prin modificarea succesiunii impulsurilor de comandă la două din cele trei faze de alimentare ale motorului.

Regimul de frânare se realizează prin inversarea semnului valorii impuse pentru frecvența de alunecare rotorică în blocul electronic de reglare corelat cu realizarea schemei de dispersie a energiei de frânare, pe rezistențele conectate în circuitul intermediar de tensiune constantă și cu dezexcitarea generatorului sincron..

În figura 8.9 sunt prezentate caracteristicile de cuplu și de curent statoric ale motorului asincron, în funcție de frecvența statorică.

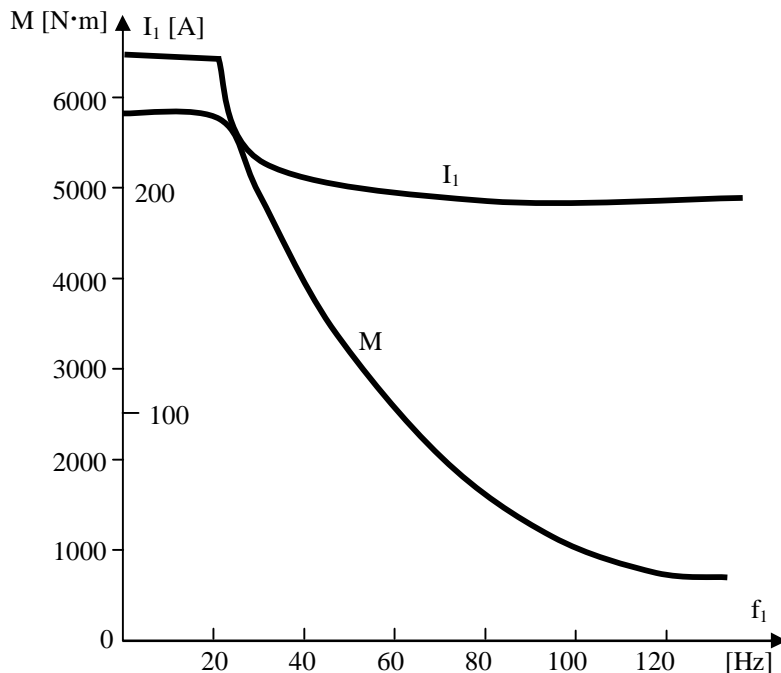


Figura 8.9. Caracteristicile de cuplu și de curent statoric, în funcție de frecvența statorică. pentru motorul asincron

## 8.2. ELECTROMOBILE

Semnalul de alarmă în dezvoltarea automobilului cu motor cu ardere internă, l-a dat poluarea atmosferei în zona urbană. Raportul anual din 9 Feb 1989, al World Watch Institute din Washington atrage atenția omenirii că, dacă nu se va reduce nivelul eliberării în atmosferă a substanțelor poluante există riscul ca locuitorii Terrei să declanșeze fenomenul de incalzire globala. Cantitățile mereu sporite de anhidridă carbonică (cu o creștere anuală de 0,4%), oxizi de azot, oxizi de carbon, vapori de plumb, clorofluorocarburi (gaze cu spor anual de 5%) contribuie la încălzirea atmosferei prin distrugerea stratului de ozon care protejează planeta de radiațiile ultraviolete.

Pe lângă poluarea chimică a atmosferei un alt mare produs nociv de care se face vinovat automobilul față de mediul ambiant este zgomotul. Acționând asupra scoarței cerebrale, zgomotul provoacă iritații nervoase accelerează procesul de oboseală, slăbește atenția și reacțiile psihice.

Apare așadar, evidenta oportunitate a utilizării unui vehicul nepoluant și silențios în circulația urbană această concluzie este cea care, la începutul anilor 60 a redeschis era automobilelor electrice. Cercetările au primit apoi, un nou impuls odată cu atingerea apogeeului unui nou fenomen: criza energetică, fenomen de exploatare, care la nivelul anului 1973 a pus în evidență problema disponibilităților de rezerve de țiței, determinând statele lumii să treacă la programe concrete de cercetare și dezvoltare.

Fiecare țară încearcă alternative pentru țiței, în funcție de sursele de energie autohtone, gaze naturale (rezerve epuizabile

aproape în aceeași măsură ca și țițeiul), cărbune precum producerea de metanol, hidrogen, energii regenerabile etc.

Utilizarea energiei electrice este favorabilă prin faptul că infrastructura necesară, sub forma sistemelor de distribuție publică este deja disponibilă și poate fi folosită cu mici modificări. De asemenea electricitatea, spre deosebire de alcoolii sau benzină sintetică poate fi produsă din toate sursele primare de energie cunoscute, ceea ce reprezintă un factor esențial în eventualitatea că una din aceste forme devine deficitară.

În comparație cu vehiculele propulsate prin motoare cu combustie internă, VEM autonome alimentate de la acumulatoare electrice prezintă un randament electric mult superior. În timp ce la vehiculele din prima categorie numai 14% din energia totală este folosită pentru tracțiune, la VEM energia utilizată este de 50 % din energia totală.

Dezvoltarea vehiculelor electrice este strâns legată de evoluția electricității și a tehnologiilor de conversie a energiei electromecanice.

La începutul anilor 1800, mijloacele de transport erau propulsate doar prin puterea aburului, deoarece legile inducției electromagnetice, și prin urmare, motoarele și generatoarele electrice nu erau încă descoperite. Faraday a descoperit în 1831 legea inducției electromagnetice și la scurt timp a inventat motorul de curent continuu. Primele vehicule echipate cu baterii nereîncărcabile au fost testate în 1834 și 1851. Bateriile electrice cu plumb au fost realizate în 1859, iar în 1874 au fost utilizate pe un vehicul electric. În 1870 electricitatea este produsă de dinamo-generatoare. Prima mașina echipată cu motor cu benzină a fost realizată în 1885.

În anul 1900 au fost vândute în lume un număr de 4230 de automobile din care 40% erau echipate cu motoare cu abur, 38% cu motoare electrice și 22% cu motoare termice. În 1912 erau înregistrate 34000 vehicule electrice, numărul vehiculelor electrice depășind pe cel al vehiculelor cu benzină, raportul fiind de 2 la 1.

Vitezele unora din primele vehicule electrice sunt menționate mai jos :

- În 1897, Krieger Co. a realizat un vehicul electric cu o viteză maximă de 24[km/h] și o distanță parcursă în sarcină de 80[km]
- În 1915, compania Woods a realizat un vehicul electric cu viteza maximă 64[km/h] și o distanță parcursă în sarcină de 160[km],

În anii 1920 începe declinul vehiculelor electrice iar vehiculele cu motoare cu ardere internă devin predominante. Factorii care au condus la dispariția vehiculelor electrice, au fost:

1. inventarea demarorului (pentru pornirea motorului) în 1911 a permis pornirea mai ușoară a vehiculelor pe benzină
2. creșterea producției de serie a vehiculelor pe benzină au făcut ca acestea să devină mai ieftine decât vehiculele electrice
3. accesul limitat la electricitate pentru încărcarea bateriilor, comparativ cu benzina care putea fi distribuită ușor.

Interesul pentru vehiculele electrice a reapărut în anii 1960, în primul rând datorită poluării mediului înconjurător de către emisiile vehiculelor cu motoare cu ardere internă. Marii producători de vehicule cu motoare cu ardere internă, Toyota, General Motors (GM) și Ford, s-au implicat în cercetarea și dezvoltarea vehiculelor electrice. General Motors a început un

program de 15 mil. \$ care a culminat prin realizarea vehiculelor numite Electrovair (Electrovair I(1964) si Electrovair II (1966) cu următoarele caracteristici :

- motor - motor de inducție trifazat, 115 [CP], 13000 [rot/min],
- baterie - argint-zinc (Ag-Zn), 512[V],
- sursă reglabilă - invertor curent continuu-curent alternativ, folosind un redresor comandat
- viteza maximă -128[km/h],
- distanța -  $65 \div 130$  [km]
- accelerație - 0-100 [km/h] în 15,6[s],
- greutate vehiculul - 1700[kg].

Un dezavantaj major al vehiculului Electrovair era grupul de baterii argint-zinc (Ag-Zn) care era prea scump și prea greu, cu un ciclu de viață scurt și un timp de încărcare lung.

Tehnologia din anii 1960 nu a fost însă suficient de avansată pentru a produce un vehicul electric ,comercial viabil.

La începutul anilor 1970, deoarece prețul benzinei a crescut dramatic ,datorită unei crize energetice, a crescut interesul pentru surse de energie alternative și respectiv pentru vehicule electrice. În 1976, în SUA s-a adoptat o lege publică privind cercetarea, dezvoltarea, și testarea vehiculului electric și hibrid. Au fost lansate programe naționale pentru promovarea tehnologiilor vehiculelor electrice și hibride și pentru demonstrarea fezabilității comerciale a acestora.

În anii 1970 General Motors a realizat un vehicul electric cu următoarele performanțe:

-acționare cu motor de curent continuu cu excitație separată cu o putere de 25[Kw], 2400[rot/min];



- alimentare de la un grup de baterii Ni-Zn cu o tensiune de 120[V] și o baterie auxiliară Ni-Zn de 14[V];
- un chopper cu tiristoare pentru reglarea tensiunii indusului și un chopper cu tranzistoare bipolare pentru alimentarea circuitului de excitație;
- viteza maximă 96[km/h];
- acelerație de la 0 la 88 [km/h] în 27[s];
- distanța parcursă 100-130[km].

Acest vehicul electric a fost folosit în principal ca un stand de testare pentru bateriile Ni-Zn. Testarea pe șosea pe o distanță de circa 60000km a dovedit fiabilitatea acestui vehicul electric.

În perioada anilor 1980-1990, au avut loc progrese extraordinare în domeniile dispozitivelor semiconductoare de înaltă frecvență și de mare putere, a microprocesoarelor, care au permis realizarea de convertoare de putere cu performanțe îmbunătățite pentru comanda eficientă a motoarelor electrice.

Motivate de preocuparea pentru poluare și de criza potențială de energie, agenții guvernamentale, laboratoare de cercetare și marii producători de automobile au lansat un număr de inițiative pentru dezvoltarea vehiculelor cu emisii zero.

Dezvoltarea vehiculelor electrice din ultimii ani pot fi atribuite următorilor factori:

- existența unei activități de cercetare de nivel înalt la marii producători de automobile
- apariția de noi producători independenți puternici;
- calitatea mai bună a noilor prototipuri;
- existența unei activități de nivel înalt în domeniul vehiculelor hibride;

- extinderea conversiilor individuale ale vehiculelor cu motoare termice în vehicule electrice;
- performanțele pilelor de combustie ofera solutii pentru rezolvarea problemelor legate de bateriile electrice

Se prezintă performanțele vehiculului electric GM Impact 3, realizat de General Motors în 1993:

- acționare cu un motor de inducție trifazat de 100[Kw], 12000 [rot/min];
- alimentare de la baterii de plumb (26 de baterii) de 12 [V], conectate în serie, pentru a obține o tensiune de 312 [V];
- sursă reglabilă- inverter curent continuu-curent alternativ; realizat cu tranzistoare bipolare cu poartă izolată (IGBT);
- viteza maximă- 120 [km/h];
- acelerație –de la 0 la 96 [km/h] în 8,5[s];
- distanța-145[km] pe autostradă.

Automobilul electric este încă un experiment. Modul de alimentare cu energie, structura echipamentului de acționare și chiar aspectul lui general nu sunt pe deplin stabilite. Iată câteva probleme pe care le pune înlocuirea motorului cu combustie internă, cu un motor electric alimentat de la o baterie de acumulatori:

- (1) sursa de energie sub forma bateriei tradiționale cu PB determină o autonomie redusă și o greutate mai mare a vehiculului;
- (2) mijloacele de alimentare cu energie a vehiculelor electrice nu sunt în nici un fel stabilite în comparație cu rețelele de conducte și spațiile de benzină și motorină existente pentru vehiculele clasice;
- (3) costul electromobilului este deocamdată superior costului automobilelor clasice.

Față de aceste inconveniente există numeroase avantaje ale electromobilului: (1) elimină poluarea; (2) utilizează un motor cu randament mai ridicat cu capacitate de supraîncărcare în perioada de pornire și mai fiabil; (3) folosește mai rațional resursele de energie primară, încărcarea bateriilor pe timpul nopții putând conduce la aplatizarea curbei de sarcină a sistemului energetic; (4) cheltuielile de exploatare sunt mai reduse în zona urbana; (conducerea automobilului electric este mai simplă și mai confortabilă.) În figura 8.10 se prezintă schema echipamentului de acționare al automobilului electric.

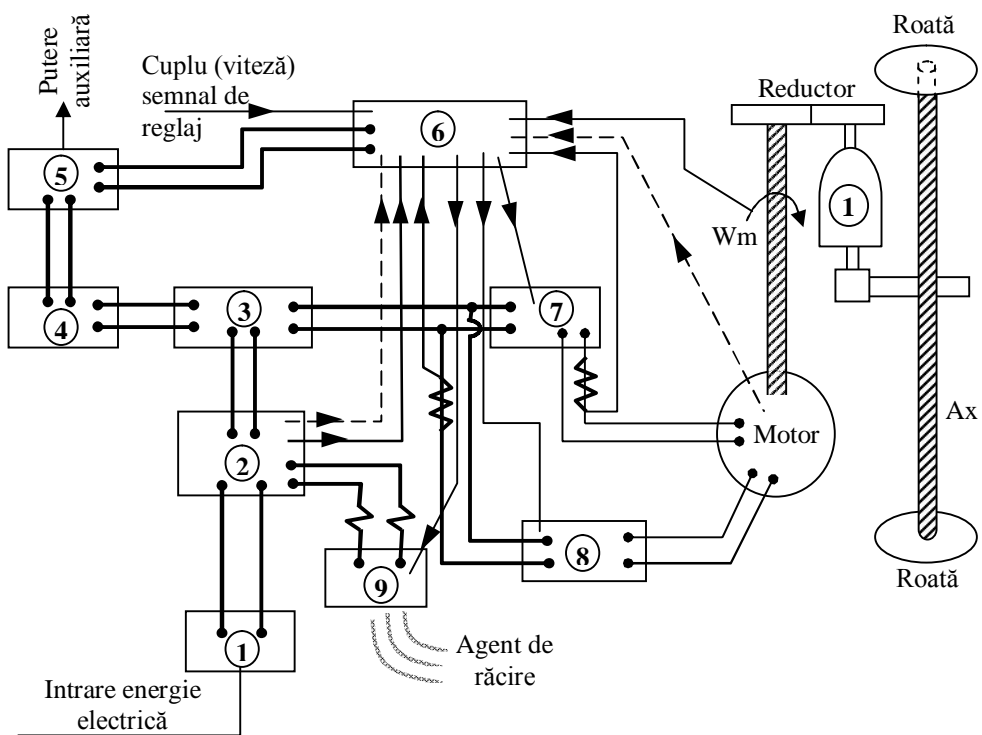


Figura 8.10. Schema echipamentului de acționare al automobilului electric

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Elementele componente sunt grupate în patru circuite:  
circuitul de forță:

- circuitul de forță, conținând dispozitivul de reîncărcare baterii 1, baterii 2, sistemul de protecție 3, convertorul static 4 și dispozitivele de reglaj ale indusului 7 și excitației 8.

- circuitul de comandă conținând dispozitivul 6 cu legăturile electrice aferente

- circuitul de reglare termică cu dispozitivul 9

- circuitul mecanic: motor-reductor-transmisia10 – diferențial – axe planetare-roți

Mărimea, forma și configurația echipamentului de acționare al VEM autonom de tip electromobil pot prezenta o mare diversitate. În tabelul 8.1 sunt prezentate principalele caracteristici ale diferitelor variante de astfel de VEM.

*Tabelul 8.1*

Cls.	Număr locuri	Sarcina utila (kg)	Viteza maxim (km/h)	Autonomia (km)	Putere motor	Destinația
A	2		30	40	1÷2	Transport de persoane sau materiale în întreprinderi, aeroporturi, parcuri
B	2	Bagaje ușoare	60	80	3÷5	Transport urban
C	2	200÷350	60	100	5÷10	Transporturi comerciale
D	8÷10	800÷1200	60	120	15÷20	Microbuze, furgonete
E	20÷40	2000÷4000	60	170	30÷50	Transport de persoane sau mărfuri

În figura 8.11 sunt date schemele de principiu ale electrocarului românesc cu rezistență reglabilă (a) și cu VTC (b).

Sistemul actual de acționare al electrocarului folosește variația tensiunii de alimentare a motorului de antrenare prin rezistență și prezintă pierderi mari. Sistemul VTC permite reglarea continuă a valorii medii a tensiunii la bornele motorului cu avantaje importante ca: (1) eliminarea pierderilor în rezistența de reglaj; (2) diminuarea contactelor mobile, necesare variației rezistenței; (3) durata mai mare de exploatare a bateriei; (4) reducerea consumului global de energie electrică.

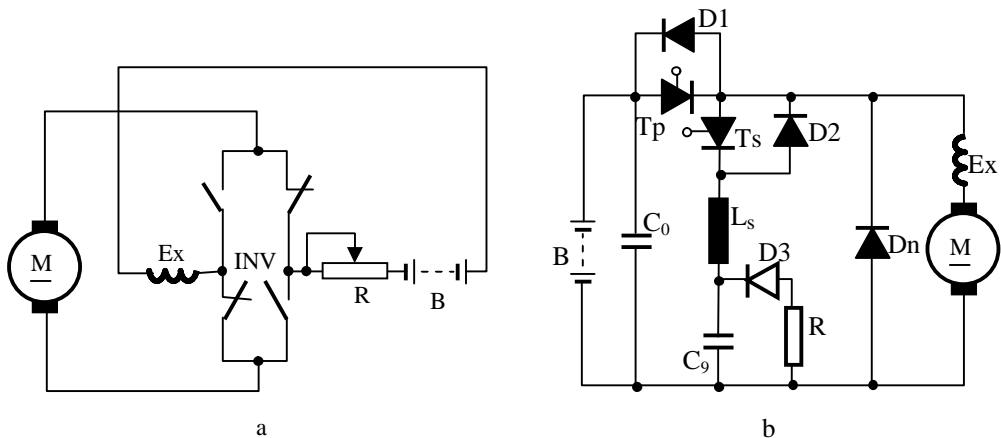


Figura 8.11. Schema de principiu a electrocarului cu rezistență reglabilă (a) respectiv cu VTC (b).

Schema bloc a dispozitivului de comandă al electrocarului cu VTC este redată în figura 8.12. VTC lucrează cu frecvență variabilă la comandă și cu perioadă variabilă de conducție. Comanda, de tip bipozițional emite semnale de închidere și deschidere a întreruptorului în funcție de valorile impuse între care oscilează curentul măsurat. Prin pedala de accelerație P a

electrocarului se comandă circuitul de prescriere a curentului prin motor CPI. În circuitul de comparare CC curentul prescris se compară cu curentul  $I_m$  de la circuitul de intrare CI. Prin circuitul poartă CP se comandă generatorul de impuls pentru tiristorul principal  $GI_{Tp}$ . Cel de-al doilea generator de la impuls  $GI_{Ts}$  este destinat comenzii tiristorului de stingere. Cu  $P_{Tp}$  și  $P_{Ts}$  s-au notat porțile celor două tiristoare din figura 8.11b. Schema mai conține circuitul de control al bateriei CCB circuitul de semnalizare a tensiunii minime a bateriei de acumulare CSB, cu  $U_B$  notându-se tensiunea bateriei. Circuitul CCCS este destinat controlului tensiunii  $U_{Cs}$  pe condensatorul de stingere.

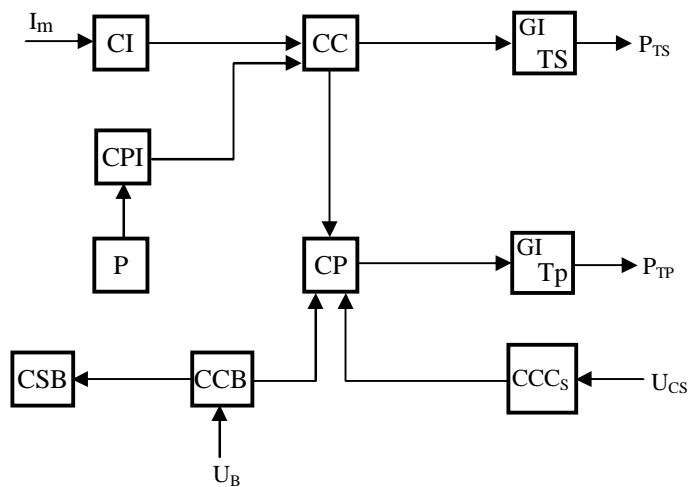


Figura 8.12 Schema bloc a dispozitivului de comandă al electrocarului cu VTC.

În figura 8.13 se prezintă consumul de energie în Wh în funcție de sarcină, comparativ, pentru cele două tipuri de electrocar. Se constată că față de electrocarul cu rezistență, electrocarul cu VTC asigură o reducere a consumului de energie

în medie cu 40%, odată cu creșterea duratei de viață a acumulatorilor.

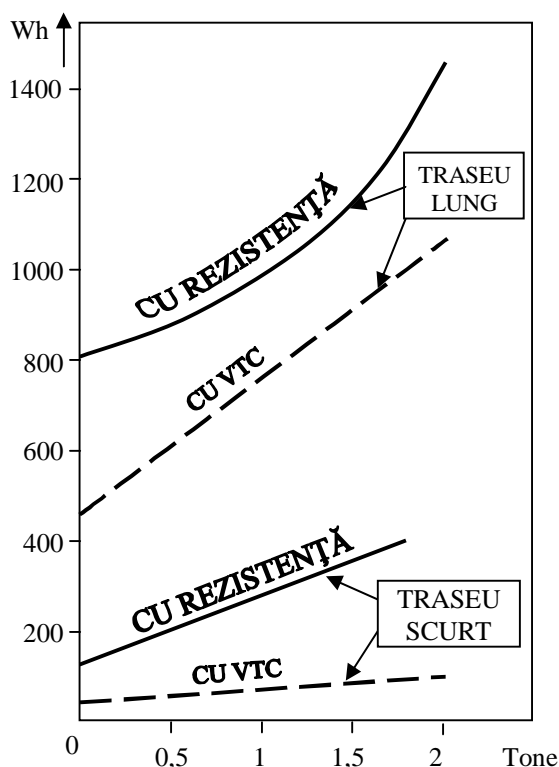


Figura 8.13. Variația consumului de energie în funcție de sarcină la electrocarul cu rezistență și cu VTC.

Electrocarul cu VTC, prin eliminarea pieselor în mișcare și a contactelor din schema de acționare prezintă o fiabilitate superioară, de asemenea permite un randament energetic mult îmbunătățit.

### 8.3. VEHICULE ELECTRICE HIBRIDE

#### 8.3.1. Introducere

Datorita autonomiei limitate, numarul vehiculelor electrice este inca relativ mic. Ca o solutie, au apărut vehiculele hibride, uzual cu motoare diesel, care antrenează un generator electric, ca sursă pentru motorul de tracțiune și încarcă o baterie de acumuloare; în fig 8.14a este prezentată varianta serie a unui astfel de vehicul hibrid, iar în figura 8.14b varianta paralelă

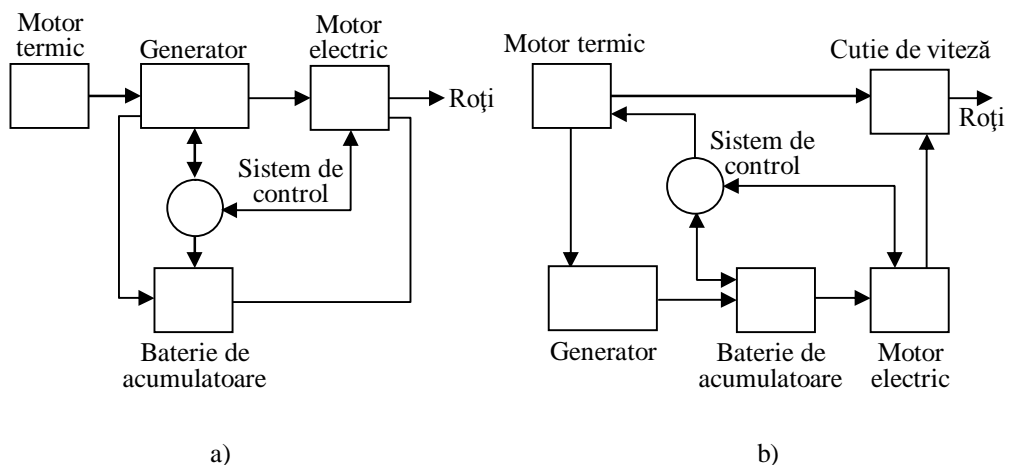


Figura 8.14. Vehicul electric hibrid, varianta serie, (a), varianta paralelă (b).

În varianta serie, energia electrică produsă de generator este utilizată după necesități, spre electromotor, fie spre bateria de acumuloare. La această variantă, motorul termic furnizează puterea medie cerută de generator, iar bateria de acumuloare acoperă vârfurile de putere în regim de accelerare și absoarbe puterea debitată de motor în regim de frânare recuperativă. La



varianta paralel, motorul electric este utilizat numai pentru a furniza puterea adițională în perioada de accelerare și pentru a recupera energia în perioada de frânare. În acest fel la vehiculele hibride, motorul electric ajută motorul termic să funcționeze mai eficient într-un domeniu larg de viteze și de sarcini.

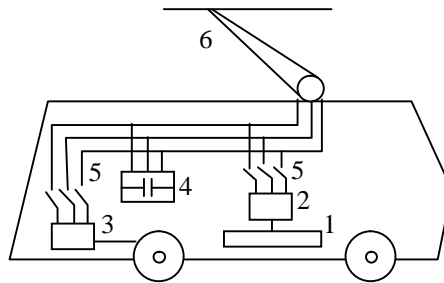


Figura 8.15 Variantă de vehicul hibrid cu volant.

În figura 8.15 se prezintă o altă variantă de vehicul hibrid realizat de firma Oerlikon și folosit în orașul Hamburg, RFG. Echipamentul de acționare consta dintr-un volant 1 introdus într-o carcasă în atmosferă de hidrogen. În stații prin captatorul 6 se alimentează mașina asincronă 2, care accelerează volantul. Apoi, se desprinde captatorul 6 și volantul 1 devine mașină primară, antrenând mașina asincronă 2 care lucrează ca generator asincron autoexcitat de la bateria acumulatori 4, alimentând motorul de tracțiune 3 prin contactorul 5.

Printre direcțiile urmărite în activitatea de cercetare-dezvoltare în domeniul electromobilelor, se menționează:

- (1) perfecționarea bateriilor de acumulatori;

(2) optimizarea sistemelor de acționare (convertor static – mașină electrică, sistem de reglare automată) cu scopul principal al reducerii costurilor de fabricație;

(3) elaborarea unor caroserii ușoare;

(4) crearea unui sistem adecvat pentru întreținerea curentă, în special pentru încărcarea bateriilor de acumulate.

Dezvoltarea automobilelor poate fi considerată unul dintre principalii factori care au determinat creșterea libertății de mișcare și stimularea continuă a dezvoltării economice. În momentul de față, una din 5 persoane active din Europa (una din patru în SUA) este angrenată în mod direct în industria automobilelor (cercetare, fabricație, producție componente, întreținere, exploatare, reparații) sau în domenii orizontale, conexe (combustibili, comerț, siguranța circulației, drumuri, protecția mediului, etc.). Performanțele automobilelor au fost determinate la început de perfecționarea sursei de propulsie în special sub aspectul corelării fiabilității cu tendința reducerii raportului masă/putere (masă specifică). Utilizarea petrolului ca sursă unică de energie a vehiculelor de călători a determinat crize economice și politice care s-au amplificat pe măsura reducerii rezervelor de petrol ale lumii. Numărul de automobile de pe planeta noastră crește continuu și aproape s-a dublat în ultimii 10 ani.

Prin creșterea numărului de automobile introduse în circulație în fiecare an, pe lângă creșterea consumului de combustibil, s-a accentuat problema poluării, datorită emisiilor de noxe ale motoarelor cu ardere internă utilizate pentru propulsia lor. După anul 1970, datorită creșterii numerice explozive a automobilelor, s-a estimat că evoluția consumului de combustibil asociat implică epuizarea în mai puțin de 100 de ani, a rezervelor

petroliere cunoscute în acel moment. În consecință, dezvoltarea automobilului a fost strâns legată de reducerea consumului de combustibil și de adaptarea sistemelor de propulsie la funcționarea cu alte tipuri de combustibili.

Panica privind epuizarea rezervelor sa mai estompat pe parcurs pe de o parte din cauza descoperirii unor noi resurse petroliere (subacvatic), iar pe de alta, datorită posibilității înlocuirii combustibililor clasici cu alții similari, obținuți prin sinteză, deveniți competitivi ca preț. Totuși cerința reducerii consumului de combustibil a devenit și mai acută întrucât este strâns legată de poluarea mediului înconjurător. Marile aglomerații urbane sunt confruntate cu o creștere periculoasă a produșilor toxici emanați din gazele de eșapament, devenită inacceptabilă prin efectele asupra sănătății populației. Astfel în țările dezvoltate cheltuielile ocazionate de decesul sau îngrijirile medicale generate de poluare au ajuns să depășească (uneori de câteva ori) costurile aferente accidentelor rutiere.

În România indicele de motorizare este relativ redus ( cel mai mic din Uniunea Europeană) și ca atare problematica legată de poluare nu este încă presantă.

Automobilul necesită o sursă de propulsie a cărui cuplu motor să aibă cea mai mare valoare la turație nulă ceea ce nu se poate obține de la motorul cu ardere internă clasic, mai ales la cel supraalimentat. Pe lângă acest inconvenient apar și problemele economice inerente determinate de randamentul slab al conversiei energiei în motoarele cu ardere internă. Randamentele cele mai mari ale motorului cu ardere internă se situează în apropierea regimului nominal, rar întâlnit în exploatarea unui automobil.

Vehiculele electrice, ar putea reprezenta o soluție din acest punct de vedere, dar numărul lor nu este încă semnificativ. Vehiculele electrice sunt alimentate de la baterii electrice care sunt încărcate în stații de la surse alimentate de la rețele de energie electrică produsă în centrale electrice. Dacă se apreciază randamentul global, plecând de la petrolul brut la efortul de tracțiune la roată, pentru cele două soluții: autovehicul clasic cu motor cu ardere internă și autovehicul electric alimentat de la baterii electrice, diferența dintre randamentele lor nu este foarte mare.

Dacă ne referim însă la emisii, avantajul este net în favoarea vehiculelor electrice. Emisiile datorate energiei care este produsă în centrale electrice (instalații fixe, localizate), sunt mult mai ușor de controlat decât cele produse de motoarele cu ardere internă ale vehiculelor care sunt individuale și dispersate. De obicei instalațiile de putere sunt plasate în afara ariilor urbane, emisiile lor afectează mai puțin populația care locuiește în aceste orașe. Prin utilizarea motoarelor electrice și a controlerelor de mare eficiență vehiculele electrice furnizează mijloacele pentru realizarea unui sistem de transport urban curat și eficient și a unui mediu înconjurător prietenos. Vehiculele electrice sunt vehicule cu emisii zero, numite și vehicule de tip ZEV (zero-emissions vehicles).

Orice vehicul care are mai mult de o sursă de putere poate fi considerat vehicul electric hibrid. Dar această denumire se folosește cel mai frecvent pentru un vehicul care utilizează pentru propulsie o combinație dintre o acționare electrică și o acționare cu motor termic a cărui sursă de energie este combustibilul fosil.

Primul vehicul electric hibrid a fost conceput înainte de 1900. Concepția vehiculului electric hibrid VEH cu motor termic-motor electric urmărește depășirea inconvenientelor vehiculelor pur electrice, a căror motoare sunt alimentate de la baterii electrice: durata limitată de utilizare (autonomia redusă) și timpul mare de încărcare al bateriilor.

Motoarele termice de pe vehiculele electrice hibride se pot utiliza în toate variantele de motoare incluzând cele cu aprindere prin scântei, cu injecție de benzină, în 2 sau 4 timpi, motoarele Diesel, motoarele Sterling sau turbine cu gaze. Motoarele termice sunt proiectate pentru a funcționa la eficiență maximă, pentru a se reduce consumul de combustibil fosil și emisiile de noxe la nivelul cel mai mic posibil. Aceasta se obține prin combinarea celor două sisteme de propulsie și prin utilizarea unor strategii de control complexe pentru optimizarea interacțiunii lor.

Atunci când ne referim la un autovehicul convențional, sistemul de propulsie utilizează un motor cu combustie internă cuplat la transmisia mecanică și roțile motoare prin intermediul unei cutii de viteze care are rolul unui dispozitiv de adaptare dintre motor și sarcina sa.

Dacă dorim ca un vehicul să poată realiza o accelerație adecvată și pentru a putea urca anumite pante cu o viteză acceptabilă este necesar să se utilizeze pentru propulsia sa un motor termic cu o putere maximă de ieșire de aproximativ 10 ori mai mare decât puterea cerută de vehicul pentru deplasarea cu aceeași viteză pe o cale de rulare în palier și aliniament. Deoarece puterea cerută pentru deplasarea vehiculului este relativ mică în majoritatea condițiilor normale de funcționare, motorul termic nu va putea funcționa cu un randament bun. Îmbunătățirea

semnificativă a randamentului motorului termic convențional poate fi obținută prin utilizarea unei transmisii continuu variabile (CVT) controlată electric. Cu o asemenea transmisie, combinată cu un control electronic optimizat al consumului de combustibil se poate asigura ca motorul termic să funcționeze mult mai aproape de condițiile optime pentru un domeniu mare de viteze și condiții de sarcină diferite. Totuși îmbunătățirea randamentului vehiculului este limitată datorită randamentului mic al motorului cu ardere internă.

În cazul unui vehicul convențional nu pot fi recuperate pierderile de energie pe durata frânării. La un vehicul electric, sau un vehicul electric hibrid, energia de frânare poate fi utilizată pentru reîncărcarea bateriilor electrice. În cazul vehiculului electric hibrid, în funcție de modul în care sunt cuplate și controlate cele două surse de putere, este posibil ca motorul cu ardere internă să funcționeze la o viteză și sarcină aproape constante, în condițiile unei eficiențe mari și a unor emisii mici.

Vehiculul electric hibrid funcționează ideal într-un domeniu în care puterea cerută de condițiile de deplasare (teren, stil de conducere) este mai mică decât puterea bateriei, cu pornirea automată și funcționarea motorului termic când puterea cerută nu poate fi satisfăcută de acționarea electrică sau bateria a fost descărcată suficient și se impune reîncărcarea ei. Este de dorit ca greutatea bateriilor să fie cât mai mică reducându-se astfel energia consumată pentru transportul acestora.

În scopul reducerii emisiilor, se impune ca perioada de funcționare a vehiculelor numai pe baterii să fie cât mai lungă. Se satisfac astfel cerințele ca în marile orașe vehiculele să fie acționate numai electric (cu emisii zero). Pentru realizarea

obiectivelor operaționale ale oricărei structuri hibride particulare trebuie alese judicios : capacitatea bateriei, puterea motorului termic și algoritmi de control utilizați.

## 8.3.2 Vehicule electrice și vehicule electrice hibride

Cererea acută de automobile și dezvoltarea sistemelor de transport a făcut ca în prezent numărul de vehicule(automobile) la nivel mondial să fie de peste 500 milioane , iar estimările arată o dublare a numărului lor în circa 20 de ani, figura 1.1. În aceste condiții se ridică o serie de probleme majore legate de asigurarea combustibililor necesari precum și de creșterea emisiilor poluante în atmosferă, cu efecte negative asupra mediului. Vehiculele electrice și hibride reprezintă soluții viabile pentru aceste probleme, ele trecând de faza strict experimentală și ajungând în prezent, cel puțin o parte, într-o fază de comercializare.

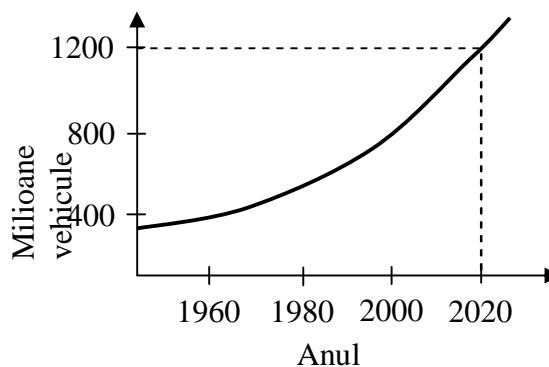


Fig.8.16. Dinamica numărului de vehicule la nivel mondial

În principiu, se au în vedere trei tipuri de astfel de vehicule, și anume:

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- vehicule electrice echipate cu baterii electrice și/sau supracondensatoare, numite BEV (Battery Electric Vehicles),
- vehicule electrice hibride, care combină propulsia convențională bazată pe motoare termice alimentate cu combustibili petrolieri cu propulsia cu motoare electrice alimentate de la baterii sau supercondensatoare, numite HEV (Hybrid Electric Vehicles),
- vehicule electrice echipate cu pile de combustie numite FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles).

Tabelul 8.2 Caracteristici ale vehiculelor electrice și hibride

	<b>Vehicule Electrice</b>	<b>Vehicule Electrice Hibride</b>	<b>Vehicule cu pile de combustie</b>
<b>Sistem Energetic</b>	-Baterii electrice -Super- condensatoare	-Baterii electrice -Super- condensatoare -Motoare termice	Pile de combustie
<b>Surse de energie/ Alimentare cu energie</b>	Încarcare de la rețeaua electrică	-Stații de benzină -Încărcare de la rețeaua electrică (opțional)	Hidrogen, metanol, gaz
<b>Caracteristici</b>	-Emisii poluante nule -Autonomie 100- 200[km]	-Emisii poluante reduse -Autonomie mare -Dependente de combustibili fosili -Sisteme complexe -Disponibile pe piață	-Emisii poluante nule sau foarte reduse -Eficiență energetică mare -Independența de combustibili fosili -Autonomie medie -Preț ridicat -Aflate încă în cercetare



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

<b>Probleme Majore</b>	-Incărcarea bateriilor -Masa și volumul bateriilor	-Managementul surselor multiple de energie -Masa și volumul bateriilor	-Preț de cost ridicat -Producerea și stocarea H <sub>2</sub> -Siguranța în exploatare
----------------------------	---	--	---

Tabelul 8.2. , prezintă câteva caracteristici comparative pentru aceste tipuri de vehicule care se află în diferite stadii de dezvoltare și de implementare practică. Foarte pe scurt, se poate spune că vehiculele electrice BEV sunt eficiente pentru transport pe distanțe relativ scurte și la viteze relativ reduse, vehiculele electrice hibride HEV reprezintă o soluție pe termen mediu, prețul de cost fiind încă un impediment în dezvoltarea lor, iar vehiculele cu pile de combustie FCEV reprezintă soluția pe termen lung, pe măsura dezvoltării tehnologiilor necesare producerii și exploatării lor.

Interesant este faptul că primul vehicul electric a fost realizat în 1834 în Rusia de către Iacobi, fiind o barcă echipată cu baterii de acumuloare. Apariția și dezvoltarea vehiculelor cu ardere internă a dus la stoparea evoluției vehiculelor electrice. Abia în anii 1970, după crizele energetice și petroliere și după începerea conștientizării efectelor negative pe care vehiculele cu motoare termice le au asupra mediului înconjurător, vehiculele electrice revin în actualitate.

În figura 8.17 se prezintă tendințele de dezvoltare ale vehiculelor în timp. Cele trei tipuri de vehicule moderne se bazează pe o serie de tehnologii care într-o anumită măsură sunt similare, vehiculele cu hidrogen fiind considerate ca țintă pe termen mediu și lung în privința transportului curat și eficient. Dezvoltarea lor depinde de îmbunătățirea bateriilor NiMH și a

celor cu litiu, de utilizarea de supercondensatoare, de folosirea unor materiale foarte ușoare dar rezistente, de reducerea rezistențelor la rulare la viteze mici și medii, de perfecționarea sistemelor de control și optimizare. Vehicule precum Ford EV1 (1997), Mercedes Necar5 (2005), sau Nissan Altra EV au fost realizate într-o primă variantă experimentală/demonstrativă, în timp ce Toyota Prius și Honda Insight reprezintă vehicule hibride deja disponibile pe piață.

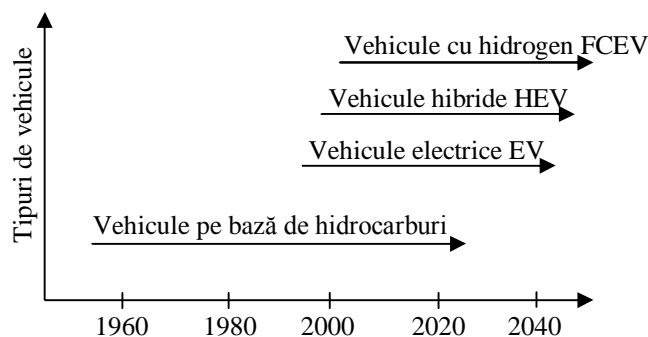


Figura 8.17 Perspectivile de dezvoltare ale vehiculelor

Principalele elemente ale vehiculelor electrice hibride sunt motorul electric și motorul termic, sursa de energie electrică și/sau sistemul de stocare a energiei electrice, transmisia, electronică de putere și sistemele de comandă și control care asigură funcționarea vehiculelor în ansamblu. În figura 8.18 se prezintă subsistemele posibile ale unei configurații de vehicul hibrid .

Ca motor termic se poate folosi orice motor termic utilizat și pe vehiculele convenționale, dar proiectat și optimizat pentru sistemul vehiculelor hibride.

Ca motoare electrice se folosesc mai mult motoare de curent continuu (Mcc), motoare asincrone (MAS), motoare

sincrone cu magneți permanenți (MSMP), sau motoare cu reluctanță variabilă (MRV).

Pentru electronica de putere se folosesc tiristoare GTO, tranzistoare Mosfet sau IGBT, iar comanda se poate face cu microprocesor, microcontrolere sau cu DSP folosind diverse tehnici (VVVF- frecvență și tensiune variabilă, CV-comandă vectorială, CaD-comandă adaptivă, CN- control neuronal, control fuzzy). Ca surse de energie electrică se folosesc diverse tipuri de baterii, supercondensatoare, pile de combustie. Chiar și din această succintă prezentare rezultă complexitatea vehiculelor electrice hibride, și de aici complexitatea problemelor care trebuie rezolvate pentru simularea, modelarea, construcția și utilizarea lor.

### **8.3.3. Vehicule hibride complet electrice**

Vehiculele hibride complet electrice se înscriu, prin scopurile practice, funcționale și de proiectare, în categoria vehiculelor “pur” electrice și nu în cea a vehiculelor hibride. Aceasta deoarece energia lor de propulsie este în întregime stocată sau generată electric, iar puterea folosită de la sursele electrice principale și auxiliare este gestionată și combinată pentru scopuri pur electrice sau electronice. Însă, totuși, vehiculelor electrice cu două surse de energie li s-a dat denumirea de hibride.

Vehiculele hibride complet electrice folosesc, pe lângă bateria principală, baterii speciale sau supercondensatoare, ca sursă de energie secundară. Aceste surse de energie secundare sunt proiectate să furnizeze putere mare pentru perioade scurte în condiții de funcționare de vârf, de exemplu, în timpul urcării în pantă sau în timpul accelerării. Acest lucru este necesar deoarece

unele baterii cu cea mai bună densitate de energie, au densitate de putere scăzută. Un exemplu extrem în acest sens este bateria aluminiu-aer. Această baterie are o densitate foarte mare de energie de 220 [Wh/kg], furnizând vehiculului o rază de acțiune potențială de 300-450km, însă o densitate de putere de doar 30[W/kg]. Deoarece este nevoie de o densitate de energie de cel puțin 150 [W/kg] pentru o accelerare bună și performanță de urcare în pantă, o sursă auxiliară cu densitate mare de putere este esențială. Această densitate de putere este ușor de obținut de la o baterie pe bază de plumb și de aceea aceasta este o baterie auxiliară foarte potrivită pentru utilizarea împreună cu o baterie aluminiu-aer într-un vehicul hibrid complet electric.

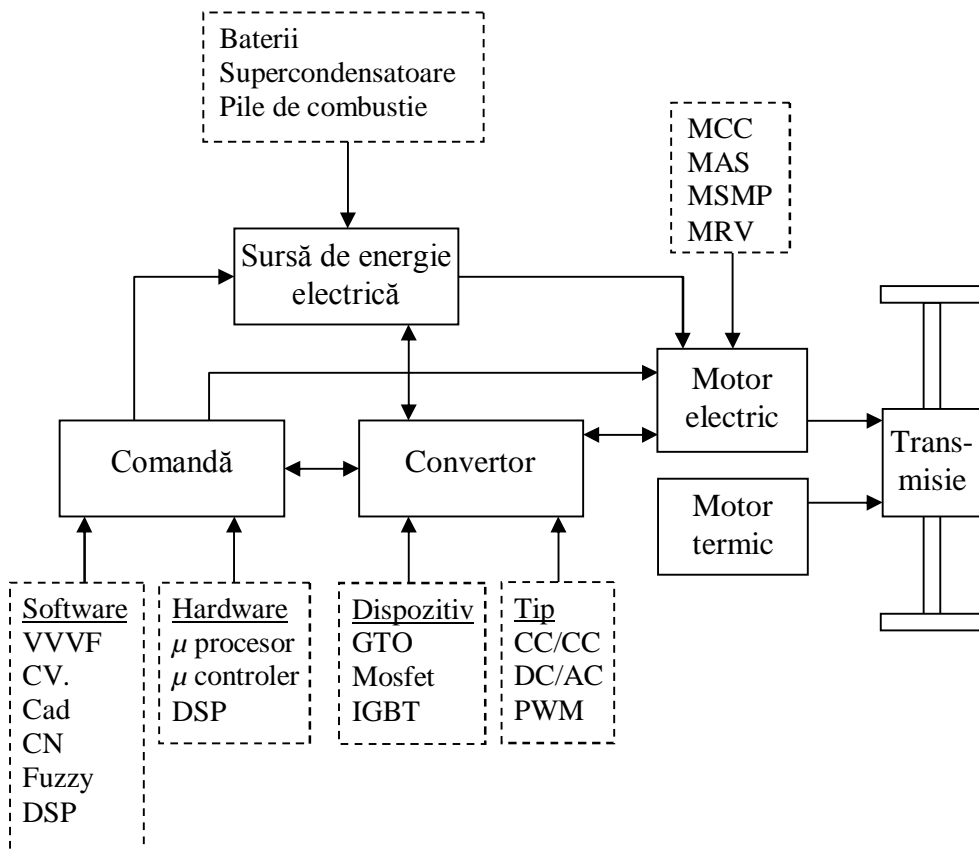


Figura 8.18 Elemente principale ale VEH

O altă combinație de vehicul hibrid complet electric, care este în dezvoltare și de mare interes, datorită îmbunătățirilor aduse pilelor de combustie, este vehiculul electric acționat cu pila de combustie cu baterie auxiliară. Această baterie poate furniza curentul mare necesar pentru pornire și poate de asemenea servi ca un dispozitiv de limitare a sarcinii care permite pilei de combustie să funcționeze la putere joasă inițial și apoi să se încălzească pentru o funcționare la randament constant. Acest aranjament sporește eficiența întregului sistem și de asemenea permite vehiculului să folosească frânarea recuperativă.

Dacă într-adevăr este necesară o accelerație ridicată atunci supercondensatorul poate fi considerat ca sursă de putere auxiliară. Supercondensatoarele disponibile în prezent, deși au o densitate de energie de doar 15 [Wh/kg], sunt capabile de densități de putere extrem de ridicate de până la 1[kW/kg], 4[kW/kg] fiind o țintă de dezvoltare de atins în următorii ani. Acestea sunt, de asemenea capabile să accepte rate mult mai mari de încărcare existente în anumite condiții de frânare recuperativă și pot fi adaptate mai eficient decât în cazul bateriilor chimice. Din nefericire, supercondensatoarele sunt încă în stadiu de dezvoltare și de aceea sunt foarte scumpe și puțin probabil să fie folosite la fabricarea vehiculelor electrice hibride în următorii ani.

O altă categorie de vehicule electrice hibride, denumite vehicule hibride electromecanice, folosește pe lângă acționarea electrică principală alimentată de la baterii și un dispozitiv mecanic de stocare a energiei cum ar fi un volant, figura 8.19, sau un acumulator hidraulic , figura 8.20. Energia stocată în volant sau în acumulatorul hidraulic este convertită în energie electrică de un grup motor-generator auxiliar și prin intermediul unui controler

central este utilizată în linia de putere dintre bateria electrică principală și motorul electric de acționare al vehiculului hibrid.

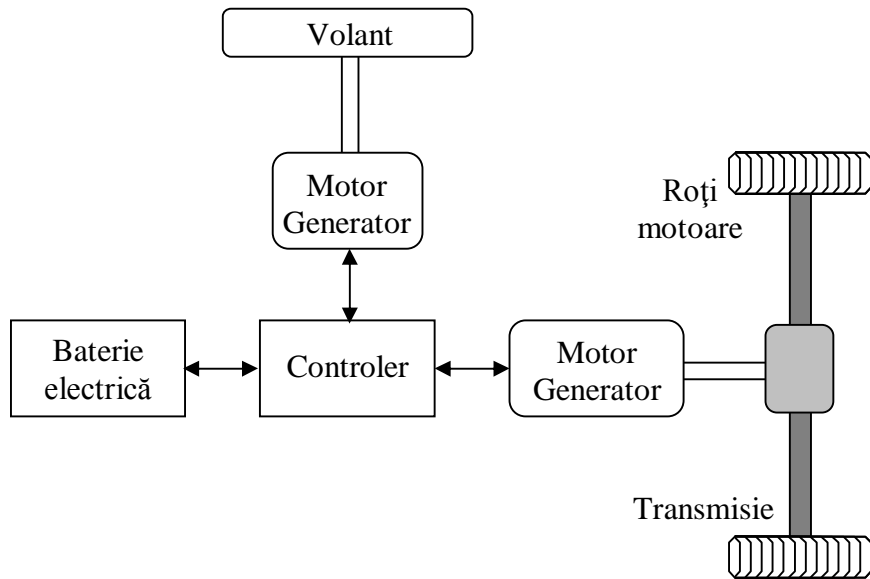


Figura 8.19. VEH cu volant pentru stocarea energiei

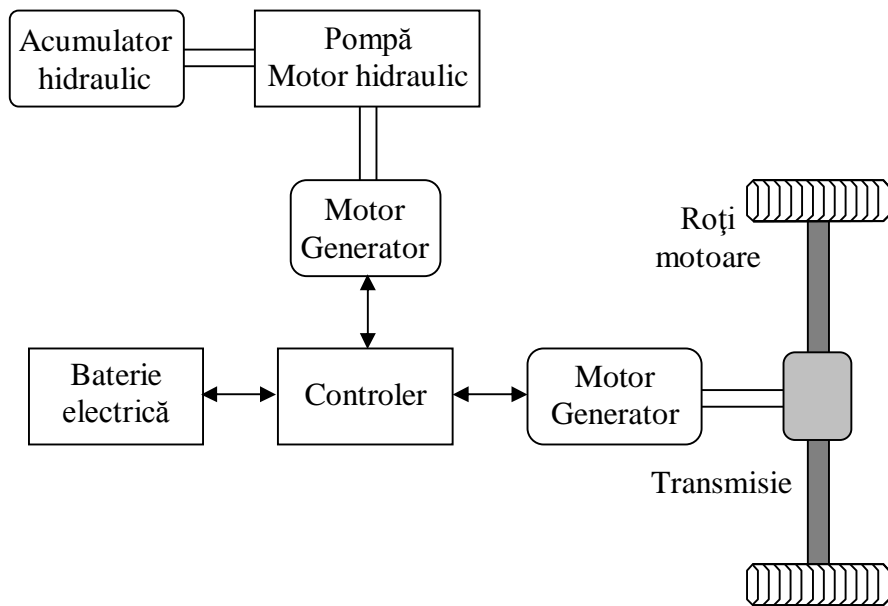


Figura 8.20 VEH cu acumulator hidraulic pentru stocarea energiei

Functionarea controlerului central se face după un algoritm care optimizează fluxul de energie pentru un randament maxim, astfel că în perioadele de deplasare cu viteză constantă energia este preluată numai de la bateria principală iar în perioadele de accelerare sau de urcare a pantelor energia stocată în volant sau în acumulatorul hidraulic este adăugată pentru a menține performanțele. În timpul frânărilor vehiculului, când motorul de acționare principal poate funcționa ca generator, energia recuperată este utilizată atât pentru reîncărcarea bateriei principale de propulsie cât și pentru creșterea vitezei volanului sau reîncărcării acumulatorului hidraulic.

### **8.3.4. Clasificarea vehiculelor electrice hibride**

În general la vehiculele electrice hibride un sistem de acționare cu motor termic este combinat cu un sistem de acționare cu motor electric. Aceste vehicule situate între vehiculele convenționale cu motor termic și vehiculele “pur” electrice, sunt cele mai bune dintre ambele sisteme. Sunt nenumărate posibilități de combinare a acționărilor cu motoare termice și cu motoare electrice. O variantă extremă ar fi utilizarea unei acționări cu motor termic de mare putere, care să fie capabil să asigure deplasarea vehiculului în majoritatea condițiilor de funcționare, cu o acționare auxiliară cu motor electric care să furnizeze o putere suplimentară numai în condițiile unor accelerații mari sau a urcării unor pante abrupte.

Un alt caz interesant ar fi utilizarea unei acționări electrice principale combinată cu o acționare auxiliară cu un mic motor termic care să suplimenteze puterea la ieșire și să reîncarce

bateria. După cum sunt cuplate cele două tipuri de acționări se deosebesc două combinații fundamentale de vehicule electrice hibride:

- a) vehicule hibride serie în care motorul termic antrenează un generator electric, de la care se alimentează motorul electric de acționare a roților motoare ale vehiculului;
- b) vehicule hibride de tip paralel la care puterea de la ambele motoare, termic și electric, este transmisă la roțile motoare, ca în figura 8.21.

Într-un vehicul electric hibrid (VEH) sunt posibile combinații complexe ale acționării principale și acționării auxiliare. În tabelul 8.3. sunt prezentate diferite tehnologii ale acționărilor principale și auxiliare și cum pot fi combinate într-un vehicul electric hibrid viabil:

A corespunde combinațiilor probabile,

B corespunde combinațiilor posibile.

Tehnologiile acționărilor principale și auxiliare au fost divizate în tehnologii cu răspuns mecanic sau electric. Volantul intră în categoria electrică deoarece cu viteza sa mare de rotație, energia cinetică de rotație stocată poate fi utilizată doar printr-un generator- motor electric. Aceasta înseamnă că modul cum furnizează energie în sistem, sau ia energie pentru reîncărcare, este văzut de către sistem ca o intrare sau ieșire electrică. Similar în cazul acumulatorului hidraulic, deși nu este imposibil de luat o comandă mecanică de la motorul hidraulic acționat de acumulator, este mult mai convenabilă conversia într-o formă electrică.



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Tabelul 8.3. Tehnologiile hibride ale acționărilor principale și auxiliare

			Acționare principală				
		Motor termic	Turbină cu gaz	Motor Stirling	Baterie-motor electric	Pilă de combustie-motor electric	Volant-motor electric
	Motor termic	-	-	-	A	B	A
	Turbină cu gaz	-	-	-	A	B	B
Acționare auxiliară	Baterie-motor electric	A	A	A	A	A	A
	Volant-motor electric	B	B	B	A	B	-
	Super-condensator	B	B	B	A	B	-
	Acumulator hidrolic-motor electric	B	B	B	A	B	-

Tabelul 8.3 arată că sunt multe combinații posibile ale acționării principale și auxiliare, unele fiind mai practice decât altele. Dacă se consideră doar combinațiile probabile se poate observa că sunt 11 de acest tip. Numărul de opțiuni poate fi crescut mai departe, deoarece cele care au motor termic ca acționare principală pot funcționa în configurație serie cât și paralel. Aceasta adaugă încă trei opțiuni și avem un total de 14. De asemenea, în configurația paralel sunt diferite căi de transmitere a cuplului mecanic la roți. În primul tip de linie de

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

acționare, atât motorul termic cât și motorul electric pot acționa roțile motoare, separate sau simultan, prin intermediul unei cutii de viteze obișnuită și este utilizată cel mai frecvent în vehicule electrice hibride experimentale. Al doilea tip de linie de acționare, în care motorul electric este montat pe același ax cu motorul termic, figura 8.21 devine mult mai des utilizat, de exemplu la Honda Insight.

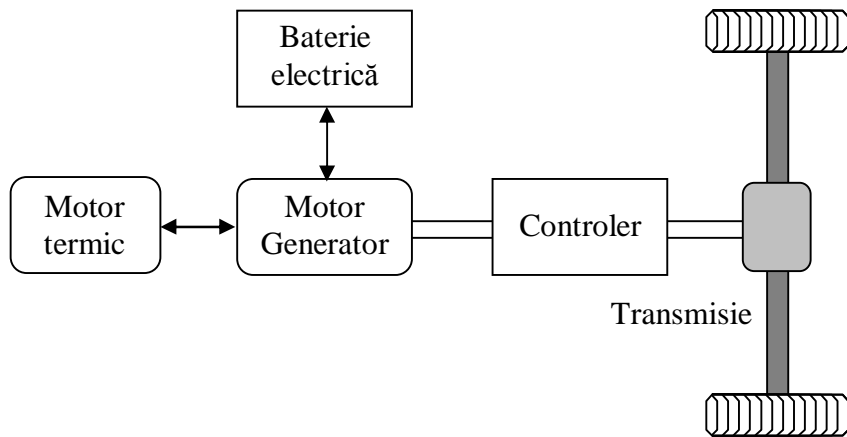


Figura 8.21 VEH acționat cu motor electric și motor termic montate pe același ax

A treia variantă presupune utilizarea a două linii separate de acționare, una mecanică pentru roțile din față și respectiv alta electrică pentru roțile din spate ale vehiculului, figura 8.22. Această structură a fost folosită la vehiculele hibride Audi Duo și Daimler Chrysler, Dodge Durango. Totuși această configurație este de un interes mai mult academic, deoarece furnizează un cost scăzut și un mod flexibil de conectare a celor două acționări prin intermediul căii de rulare, prin contactul dintre roți/cale de rulare, de la ambele capete ale vehiculului. Asemenea variante de acționare au fost utilizate la prototipuri de vehicule hibride

realizate de firme ca: Toyota, Renault, etc. Pentru coordonarea și optimizarea acționărilor separate, mecanică și electrică, de la roțile din față și din spate ale acestor vehicule este necesar un control electronic sofisticat pentru a realiza o funcționare optimă. Această variantă constructivă, cu acționare separată, mecanică respectiv electrică a celor două punți motoare, are dezavantajul că, dacă bateria trebuie reîncărcată în timpul funcționării, este necesar ca puntea cu acționare mecanică să genereze putere suplimentară pentru ca în puntea cu acționare electrică motorul electric să treacă în regim de frânare cu recuperare de energie.

Prima opțiune de linie de acționare, care folosește o cutie de viteze obișnuită, a fost utilizată în majoritatea structurilor de vehicule hibride existente. Celelalte două tipuri de linie de acționare prezentate, fiecare putând fi folosită cu oricare din cele cinci combinații de clasa A motor termic/baterie-motor electric, prezentate în tabelul 8.32, dau mai departe 10 variante posibile, ajungând la un total de 24 de variante hibride. În plus, acționarea principală cât și cea auxiliară pot varia ca putere relativ într-un interval larg și astfel fiecare prototip de vehicul electric hibrid realizat prezintă caracteristici și tehnologii diferite.

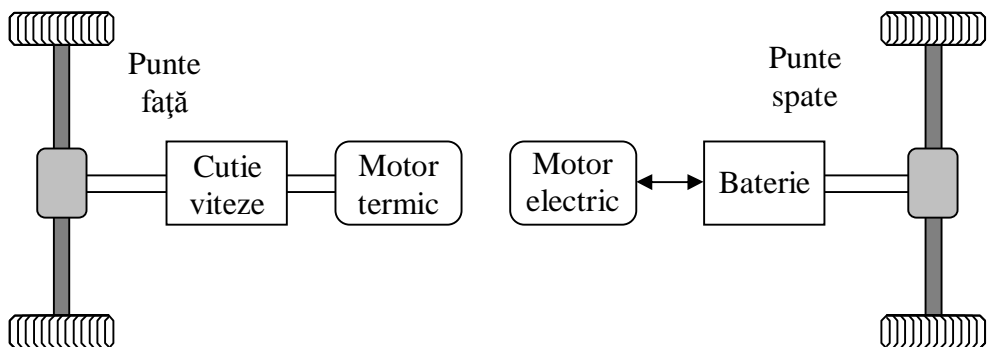


Figura 8.22 Vehicul cu acționare separată pentru puntea față și puntea spate

### 8.3.5. Probleme de mediu și piața de desfacere a VEH

Transporturile consumă o treime din toată energia folosită, fiind principala cauză a poluării mediului înconjurător prin emisiile de carbon. Dacă 10% din automobilele din SUA ar fi vehicule cu emisie zero, poluanții obișnuiți din aer, s-ar reduce cu un milion de tone pe an, și s-ar elimina 60 de milioane de tone de dioxid de carbon care produce efectul de seră. Prin electrificarea 100%, adică prin înlocuirea fiecărui vehicul cu motor termic cu un vehicul electric, s-ar obține următoarele efecte :

- Dioxidul de carbon din aer, care este legat de încălzirea globală, s-ar reduce la jumătate,
- Oxizii de azot (un gaz cu efect de seră ce cauzează încălzirea globală) ar fi reduși puțin, în funcție de utilitatea emisiilor standard stabilite de legile în vigoare,
- Dioxidul de sulf, care este legat de ploaia acidă, ar crește ușor
- Deșeurile determinate de uleiul ars ar scădea, deoarece vehiculele electrice nu necesită baia de ulei pentru motor
- Vehiculele electrice reduc poluarea fonică, deoarece sunt mai silențioase decât vehiculele cu motor termic
- Poluarea termică cu instalații mari de forță ar crește cu creșterea utilizării vehiculelor electrice

Vehiculele electrice ar reduce considerabil cauzele majore ale smog-ului, ar elimina substanțial sărăcirea ozonului și ar reduce gazele cu efect de seră. Cu standarde mai severe asupra emisiilor de SO<sub>2</sub> ale instalației de putere, vehiculele electrice ar avea un impact redus asupra nivelului de SO<sub>2</sub>. Reducerea poluării este argumentul pentru impunerea utilizării vehiculelor electrice.

În mod normal, se discută despre folosirea vehiculelor electrice pentru pasageri și transport public, dar se tinde să se uite de utilizarea lor ca vehicule utilitare în aplicații de specialitate. De-a lungul anilor vehiculele electrice au penetrat cu succes piața vehiculelor utilitare, datorită nepoluării aerului cât și prin avantaje de cost. Exemple de astfel de aplicații sunt vehiculele din aeroporturi pentru pasageri și suport la sol; vehicule recreative ca mașinuțele pentru golf și pentru parcuri tematice, vehicule folosite în întreprinderi cum ar fi cărucioarele, camionete de încărcat; vehicule pentru persoane invalide; vehicule utilitare pentru transport pe sol în incinte închise dar întinse. De asemenea sunt vehicule electrice care rulează pe piste pentru transportul materialelor în mine.

Datorita problemelor ridicate de poluarea globală, și în urma succesului transportului acționat de motorul electric în diferite domenii, interesul este în continuă creștere pentru vehiculele electrice de șosea, care să poată furniza performanțe echivalente vehiculelor cu motor termic. Impedimentele majore pentru acceptarea la scară largă a vehiculelor electrice de către publicul larg sunt autonomia limitată a acestora și lipsa infrastructurii. Soluția problemei de autonomie poate veni din cercetări extinse și eforturi de dezvoltare a bateriilor, pilelor de combustie și a altor dispozitive alternative de stocare a energiei. O abordare alternativă este de a aduce la cunoștința oamenilor problema încălzirii globale și avantajele vehiculelor electrice, ținând cont de faptul că marea majoritate a persoanelor conduc mai puțin de 80 [km] pe zi, o cerință care poate fi cu ușurință îndeplinită de tehnologia actuală. Infrastructura corespunzătoare trebuie de asemenea să fie prezentă pentru ca vehiculele electrice să devină

mai populare. Problemele legate de infrastructură sunt următoarele:

- Facilități pentru încărcarea bateriei: facilități de încărcare și stații publice și rezidențiale
- Standardizarea prizelor, cablurilor și bornelor de ieșire pentru vehiculele electrice și a problemelor de siguranță
- Vânzări și distribuție
- Deservire și suport tehnic

Pretul mare al unui vehicul electric este de asemenea un mare dezavantaj pentru piața vehiculelor electrice. Înlocuirea bateriilor, chiar și pentru vehicule electrice hibride este destul de scumpă, la care se adaugă problema vieții limitate a acestor baterii. Costul vehiculelor electrice va scădea pe măsură ce numărul lor crește, dar între timp sunt necesare subvenții și stimulente din partea guvernelor țărilor dezvoltate.

Creșterea utilizării vehiculelor electrice va determina dezvoltarea de servicii noi în următoarele domenii:

- Electronica de putere și Acționări electrice: proiectarea și dezvoltarea sistemelor electrice ale vehiculelor electrice,
- Generarea puterii: creșterea puterii cerute datorită utilizării vehiculelor electrice,
- Infrastructura vehiculelor electrice: proiectarea și dezvoltarea stațiilor de încărcare a bateriilor și de generare a hidrogenului, sistemelor de stocare și distribuție.

Toți producătorii importanți de automobile au producția proprie de vehicule electrice, multe dintre ele fiind oferite publicului pentru vânzare sau pentru închiriere. Piața de vehicule electrice este încă redusă. Dintre vehiculele electrice care sunt sau au fost până de curând disponibile se pot menționa: GMEV1, Ford

Think City, Toyota RAV4, Toyota Prius, Nissan Hypermini și Peugeot 106 Electric. Există de asemenea multe prototipuri de vehicule electrice experimentale dezvoltate de producătorii importanți de automobile. Pentru acționarea acestor vehicule se utilizează motoare de inducție sau motoare sincrone cu magneți permanenți.

În 1997 este prezentat oficial vehiculul electric hibrid Toyota Prius, circa 18000 vehicule hibride fiind comercializate în Japonia până la sfârșitul anului. În august 2000 Prius este lansat pe piața Statelor Unite ale Americii ca primul autovehicul electric hibrid cu patru uși, până în 2003 fiind vândute peste 100.000 vehicule în întreaga lume. Din anul 2004, Toyota a comercializat modelul electric hibrid Toyota Prius II- Hybrid Synergy Drive, HSD.

PSA Peugeot Citroen a realizat două vehicule electrice hibride Peugeot 307 și Citroen C4 echipate cu motor diesel și motor electric. Consumul mediu al acestor vehicule (vehicule din segmentul mediu, cel mai popular pe piața europeană) este de 3,4 l/100km, iar emisiile de CO<sub>2</sub> sunt de 90 [g/km]. Vehiculele folosesc un motor diesel de 1.6 litri echipat cu un filtru de particule, un sistem Stop&Start (STT), un motor electric, un invertor, baterii de tensiune ridicată și un sistem de electronică de putere controlat corespunzător. Sistemul permite recuperarea energiei cinetice la decelerare sau frânare, deplasarea și în regim doar electric pentru viteze de până la 50km/h, pentru deplasare în oraș. În plus, în regim de deplasare extraurban, motorul electric poate participa cu o putere suplimentară de circa 35% alături de motorul termic cu efecte semnificative în ceea ce privește

accelerația. De notat că firma PSA Peugeot Citroen dorește să scoată pe piață un vehicul electric hibrid încă înainte de 2010.

În Germania, la Salonul Auto de la Frankfurt din 2005, firma Mercedes Benz a prezentat două vehicule electrice hibride “Direct Hybrid” și “Bluetec Hybrid” care prezintă performanțe avansate în ceea ce privește consumul redus de combustibil și al poluării reduse, în condițiile menținerii performanțelor de confort și conducere ridicate, specifice firmei.

Vehiculele au la bază un motor Diesel V6 de 3,5 litri echipat cu o tehnologie de purificare a gazelor de eșapament care reduce cu 80% emisiile de oxid de azot. Motorul electric este integrat în grupul motopropulsor, motorul termic fiind oprit ori de câte ori nu este necesar.

Vehiculul Bluetec Hybrid permite dezvoltarea unei puteri combinate de 179kW și a unui cuplu combinat de 575Nm, timpul de accelerație fiind de 7,2 secunde de la zero la 100km/h. Vehiculul consumă circa 7,7 l/100km, valoare redusă având în vedere capacitatea motorului termic.

Firma Mercedes Benz a încheiat un acord de colaborare cu GM și Daimler Chrysler pentru dezvoltarea de sisteme hibride. Firma BMW și-a anunțat dorința de a participa la această colaborare.

Firma Mercedes Benz are cercetări asidue și în domeniul vehiculelor echipate cu pile de combustie, având deja peste 100 de vehicule de acest tip care au parcurs un total de circa 1 milion de kilometri în circa 90.000 de ore, datele obținute în cadrul testelor fiind utile pentru dezvoltările ulterioare.



### **8.3.6. Funcționarea vehiculelor electrice hibride VEH**

Vehiculele convenționale fabricate în prezent folosesc pentru propulsie motoare cu ardere internă, (MAI). Vehiculele electrice sunt superioare vehiculelor acționate cu motoare cu ardere internă deoarece nu utilizează combustibili fosili și sunt complet lipsite de emisii poluante, iar zgomotul generat la propulsie are un nivel extrem de scăzut. În schimb, necesitatea de a stoca o cantitate importantă de energie electrică mărește drastic spațiul necesar bateriei de acumulatori sau a bateriei de condensatori. Gabaritul dispozitivului de stocare a energiei electrice va crește atunci când se dorește o autonomie de funcționare mai mare.

Vehiculele convenționale, propulsate cu motoare cu ardere internă, utilizează energia obținută prin arderea combustibililor fosili: benzină, motorină, gaz petrolier lichefiat (GPL), etc.

Spre deosebire de ele, vehiculele electrice hibride, sunt propulsate, în principiu, cu două tipuri de energie: energie termică (convențională) provenind din arderea combustibililor fosili, respectiv energie electrică. Utilizând mai multe surse de propulsie, randamentul global de funcționare al vehiculelor electrice hibride poate fi mărit tocmai printr-o selectare judicioasă a celei mai eficiente surse de putere corespunzătoare unui anumit regim de funcționare. Acesta este de altfel și obiectivul primar al strategiei de control al vehiculelor electrice hibride, deoarece nivelul tehnologic actual al bateriilor de acumulatori impune ca aproape toată energia utilizată pentru propulsia autovehiculului (cu o autonomie rezonabilă) să provină din combustibilul fosil (benzină sau motorină) disponibil la bord. Vehiculele electrice hibride

reprezintă o punte între actualele vehicule propulsate de motoare cu ardere internă și vehiculele viitorului caracterizate de un nivel al emisiilor aproape de zero (EZEV Equivalent-to-Zero-Emission-Vehicle, respectiv ULEV-Ultra-Low-Emission Vehicle) sau, în anumite situații chiar fără poluare (ZEV Zero-Emission- Vehicle) așa cum se preconizează a fi vehiculele propulsate electric prin pile de combustie alimentate cu hidrogen. Este foarte important să fie amintit faptul că fără a parcurge treptele tehnologice și a perfecționa sistemele de propulsie hibride nu se va putea atinge nivelul superior care îl reprezintă tehnologia propulsiei cu ajutorul pilelor de combustie (fuel cell).

În momentul de față, o serie de firme constructoare comercializează vehicule electrice hibride în producție de serie: Toyota, Honda, Ford, GM. Multe alte firme au realizat prototipuri de vehicule electrice hibride, trecerea la producție de serie fiind doar o problemă de timp ce depinde de îmbunătățirea unor parametri de funcționare și de reducerea prețurilor de fabricație. În ceea ce privește linia propulsoare a unui vehicul electric hibrid, aceasta este mai complexă sub aspectul construcției, funcționării și controlului electronic decât sistemul similar al celui mai evoluat vehicul convențional prevăzut cu motor cu ardere internă.

Din punct de vedere al integrării elementelor componente, vehiculul electric hibrid reprezintă, comparativ cu soluția vehiculului propulsat doar prin motor cu ardere internă un spor de complexitate de aproximativ 25%, în timp ce, din punctul de vedere al sistemului de control, aportul de hardware și programe software este cel puțin dublu. Aceste noi elemente fac ca și prețul unui astfel de vehicul să fie mai ridicat comparativ cu cel al unui

propulsat numai prin motor cu ardere internă. Astfel, primul vehicul (automobil) electric hibrid de serie conceput de firma Toyota reprezintă cea mai sofisticată linie propulsoare integrată și cea mai complexă strategie de control realizată vreodată de firma respectivă recunoscută pentru promovarea unor idei de mare ingeniozitate și complexitate tehnică.

Vehiculele electrice hibride utilizează de regulă următoarele patru moduri de propulsie:

1. Propulsie mecanică pură prin motorul cu ardere internă, MAI, ce folosește combustibil convențional, figura 8.23; energia mecanică rezultată din aprinderea combustibilului (benzină, motorină) se transmite la roți prin intermediul transmisiei T (cutiei de transfer TC în cazul transmisiei integrale) și diferențialului D. Motorul cu ardere internă funcționează cvasiconstant în zona de randament maxim ( $75 \div 85\%$  din puterea maximă), diferența dintre puterea dezvoltată și cea necesară regimului de curent fiind transformată în energie electrică pentru încărcarea bateriei **Bat**. Conversia de energie se realizează cu ajutorul unui motor/generator electric **ME/G** și a unui bloc convertor/ inverter de putere **C&I**;

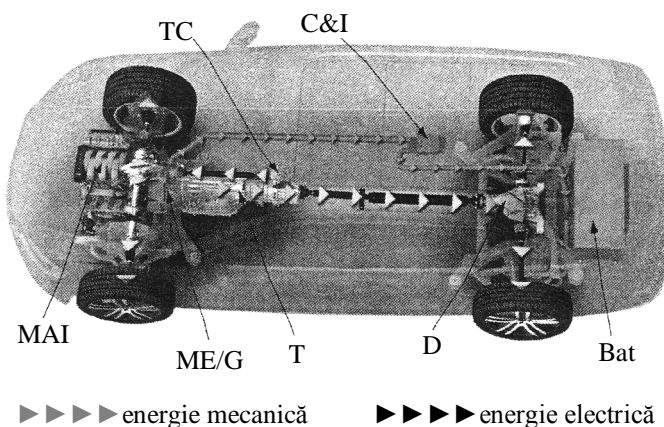


Figura 8.23 Modul de propulsie pur mecanic al VEH

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

2. Propulsie electrică pură, figura 8.24, prin motorul electric, ME/G, alimentat prin inverter de putere **C&I** de la bateria electrică **Bat.**, de regulă de curent continuu; acest mod de funcționare nu produce nici o poluare asigurând o funcționare în regim (zero-emission-vehicle) ZEV;

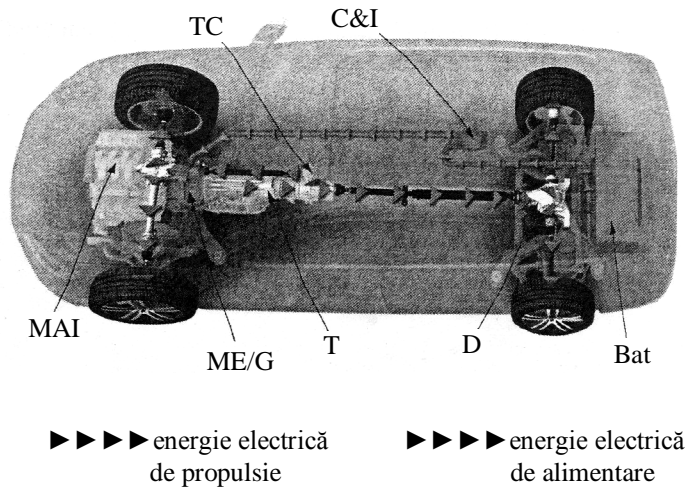


Figura 8.24 Modul de propulsie pur electric al vehiculului hibrid

3. La fel ca în cazul 2, doar că motorul cu ardere internă funcționează în regim de încărcare a bateriei. Datorită randamentului superior al motorului cu ardere internă într-un astfel de regim, modul de funcționare al vehiculului este de tip ULEV; Așa cum se va argumenta mai târziu, modul de funcționare 3 este caracteristic configurației hibride serie, numele fiind o analogie la modul secvențial de obținere a energiei de propulsie definit printr-o succesiune de conversii (mecanică, electrică);

4. Propulsie mixtă prin ambele motoare, mai precis spus motorul cu ardere internă este asistat de motorul electric pentru realizarea

puterii dorite și a randamentului maxim; regimul de funcționare este numit simbolic HEV (Hybrid Electric Vehicle propeller). Modul de propulsie mixt este specific regimurilor tranzitorii ale MAI în care puterea dezvoltată la consumul specific optim nu este suficientă pentru a oferi manevrabilitatea vehiculului dorită de conducătorul auto (accelerări, depășiri, pante ascendente pronunțate, putere maximă). Pentru a nu modifica funcționarea la parametrii optimi ai MAI surplusul de putere este dat de motorul electric pe baza energiei electrice stocate în baterie, așa cum este simbolizat în figura 8.25. Din punctul de vedere al emisiilor poluante, regimul rămâne de tip ULEV, practic MAI funcționează ca în cazul 1, cu diferența că bateria se descarcă ca în modul 2.

5. Regimul de recuperare a energiei de frânare este specific autovehiculelor electrice și hibride fiind o cale de îmbunătățire a randamentului lor. Frânarea recuperativă urmărește să utilizeze o cantitate cât mai mare din energia cinetică suplimentară vehiculului ce se dorește frânat și care, în cazul autovehiculelor convenționale se disipă sub formă de căldură în plăcuțele, etrierele și discurile de frâna. Într-o mașină electrică reversibilă, comutarea din starea de motor în cea de generator se face prin limitarea alimentării și aplicarea unui cuplu de rotație, în cazul acesta provenind de la roțile autovehiculului, figura 8.26

Conversia energiei cinetice în energie electrică are ca rezultat generarea unui cuplu invers la axul generatorului, regăsit ca un cuplu de frânare la axul roților. Nu trebuie pierdut din vedere că autovehiculul hibrid este prevăzut și cu un sistem convențional de frânare, de regulă de tip electrohidraulic ce include o serie de sisteme active de control al siguranței și stabilității precum ABS, ASR (controlul tracțiunii), ESP (controlul

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

stabilității în curbe) sau EBD(distribuția electronică a forței de frânare față-spate).

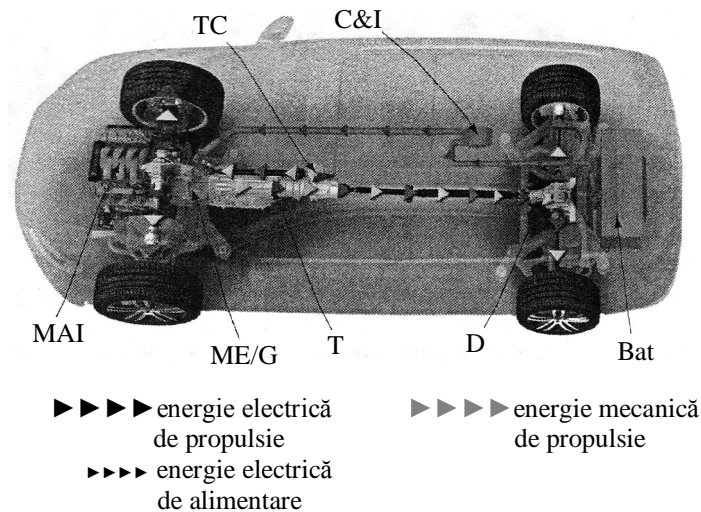


Figura 8.25 Modul de propulsie mixt (mecanic asistat electric)  
cu descărcarea bateriei

În timpul unei frânări sistemul de frânare recuperativă și sistemul clasic de frânare prin acțiunea presiunii hidraulice asupra plăcuțelor de frână pot lucra simultan.

Oricum sistemul recuperativ are întâietate în sensul că, la apăsarea pedalei de frâna, dispozitivul de control electronic determină în primul rând cuplul disponibil la axul generatorului provenit din energia cinetică a vehiculului (frâna de motor), respectiv cuplul de frânare dorit de șofer (determinat din unghiul și forța de apăsare a pedalei de frână) și numai dacă acesta din

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

urmă depășește pe primul, sistemul clasic de frânare va fi și el activat.

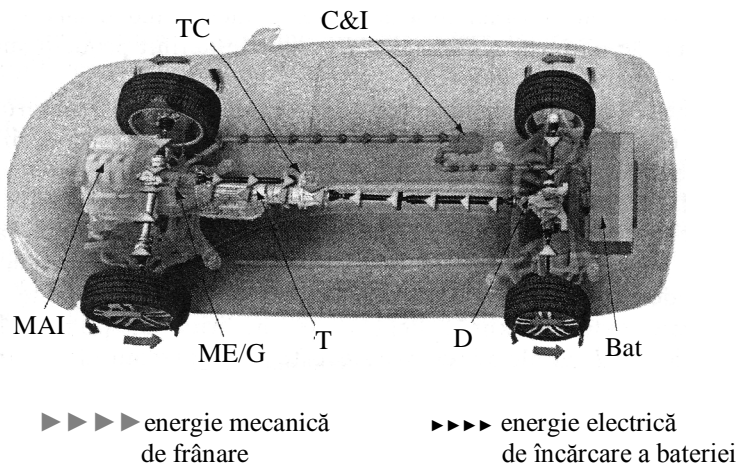


Figura 8.26 Modul de frânare recuperativă

Soluția constructivă adoptată pentru propulsia vehiculelor electrice hibride (mai ales în configurație serie) se regăsește în locomotivele diesel electrice de la care a fost probabil preluată. La aceste locomotive, un motor cu ardere internă de tip diesel acționează un generator electric, energia furnizată alimentând motoare electrice de tracțiune cuplate direct cu roțile vehiculului. Sistemul prezintă avantajul de a nu necesita un sistem de transmisie cu raport variabil cuplat între motorul diesel și roțile locomotivei. Aceasta deoarece, spre deosebire de un motor cu ardere internă al cărui cuplu de pornire este nul, motorul electric dezvoltă la turația de pornire un cuplu maxim putând fi astfel cuplat direct cu roțile; când se dorește accelerarea trenului,

motorul diesel este alimentat suplimentar pentru a determina creșterea puterii generatorului.

Spre deosebire de tren, ce rulează cu viteze cvasiconstante pe perioade lungi de timp și are o sarcină aproape de valoarea nominală determinată pentru a putea rula în regimuri apropiate de cuplul maxim, un automobil se confruntă cu un domeniu extins de regimuri de funcționare în care predomină accelerările, frânările, opririle, vitezele reduse specifice traficului intens sau mersul în gol.

La un VEH, strategia primară de control constă în selectarea sursei forței de propulsie (motorul cu ardere internă sau motorul electric) în funcție de sarcina specifică fiecărui regim de funcționare al vehiculului, astfel încât acesta să ruleze în permanență cu un randament maxim. Pentru motorul termic, regimul de randament maxim se află plasat în domeniul sarcinilor mari, astfel încât într-un vehicul electric hibrid motorul de ardere internă este forțat să lucreze în regimuri de sarcină și turație crescute. Motorul cu ardere internă funcționează cu un randament scăzut în regimuri de turație redusă atât în cazul unor sarcini mari cât și la sarcini reduse sau la mersul în gol, în regimurile tranzitorii de accelerare sau decelerare precum și în cazul pornirii mai ales la temperaturi scăzute. Strategiile de control ale vehiculelor electrice hibride urmăresc evitarea acestor regimuri prin algoritmi complecși de utilizare a tuturor resurselor energetice de la bordul vehiculului, în final scopul fiind minimizarea consumului și nivelului emisiilor poluante.

Avantajele VEH, comparativ cu cele convenționale se datorează în principal avantajelor motorului electric asupra celui cu ardere internă. Cu toate progresele tehnologice în domeniul



motoarelor cu ardere internă, încă nu se cunoaște în totalitate ce se întâmplă în camera de ardere a motorului și nu este posibil nici să se realizeze, cu o anumită precizie, regimuri succesive identice sau prestabilite. De asemenea nu se poate ști la un moment dat cu foarte mare exactitate, care va fi cuplul care se produce, cât se pierde din cuplul produs sau cât va rămâne. Pe de altă parte, cuplul unui motor electric se poate determina mult mai simplu, cunoscând tensiunea și curentul. Este posibilă generarea în orice moment a unui cuplu de ieșire prestabilit după cum, cu aceeași precizie, acesta va putea fi repetat ori de câte ori se dorește. În acest fel, o mașină electrică, pe lângă randamentul mult superior permite și un control mai precis al cuplului și turației comparativ cu un motor cu ardere internă.

Mai mult, un motor electric antrenat de un cuplu extern poate trece în regim de generator și astfel produce energie electrică, dar nici un motor cu ardere internă în regim de decelerare sau frânare nu va putea sintetiza combustibil. Astfel se explică performanțele deosebite ce pot fi realizate de un vehicul electric hibrid comparativ cu unul clasic propulsat prin motor cu ardere internă.

Relativ la VEH, obiectivul major urmărit constă în asigurarea permanentă a unei cât mai bune stări de încărcare a bateriei, indiferent de regimul de funcționare. Când cuplul de ieșire al motorului cu ardere internă depășește pe cel necesar propulsiei, surplusul de putere se utilizează pentru antrenarea unui generator electric care reface starea de încărcare a bateriei (SOC-stage of charge). Aceeași situație se regăsește în cazul frânării sau funcționării în regim de frână de motor când energia rezultată din decelerare este utilizată pentru antrenarea generatorului și

încărcarea bateriei. Există situații în care starea bateriei este bună, astfel încât recuperarea energiei rezultată dintr-un regim de decelerare nu se justifică. Pentru a asigura funcționarea eficientă cu un randament superior, în astfel de situații motorul cu ardere internă este oprit. Situația respectivă prezintă dezavantajul că dispozitivele auxiliare antrenate de regulă de motorul cu ardere internă (pompa, presiune ulei, pompa de apa, etc.) nu vor mai funcționa nici ele. Din aceasta cauză, motorul cu ardere internă aflat în stare de nefuncționare va trebui să fie antrenat de către motorul electric la o turație constantă, minimă (de regulă turația de mers în gol), consumându-se astfel surplusul de energie ce nu poate fi redirectionat spre încărcarea bateriei și asigurându-se în același timp și funcționarea continuă a dispozitivelor mecanice sau hidraulice auxiliare.

Dacă puterea cerută de regimul de funcționare al vehiculului este mai mică decât o valoare prestabilită și totodată inferioară puterii pe care motorul cu ardere internă o poate genera într-un regim de funcționare cu randament ridicat (de obicei puterea maximă a motorului cu ardere internă), vehiculul poate fi propulsat pe perioade scurte de timp sau la pornire doar de către motorul electric în cazul în care starea de încărcare a bateriei permite acest lucru. Dacă este necesară încărcarea bateriei, motorul cu ardere internă va funcționa în regimul de eficiență maximă, surplusul de putere fiind utilizat pentru antrenarea generatorului și producerea de energie electrică.

În cazul în care este necesar un cuplu sau o accelerare mare, modul 1(mecanic) sau modul (electric), vor fi imediat comutate pe modul 4 (mixt) și menținute până ce vehiculul atinge o anumită creștere de viteză necesară solicitării. De regulă, modul mixt este

un regim de asistare a motorului cu ardere internă de către motorul electric prin suplimentarea puterii primului și evitarea funcționării în regimuri neeconomice și/sau poluante.

Un VEH comandat corespunzător poate avea un consum de două ori mai redus decât vehiculul propulsat clasic de un motor cu ardere internă cu aceleași caracteristici cuplu-turație la ieșire. Aceasta înseamnă atât o autonomie dublă dar și o reducere a nivelului de poluare prin eliminarea regimurilor tranzitorii sau de funcționare în gol a motorului cu ardere internă. Pornirea clasică prin demaror, unul dintre regimurile cele mai poluante și neeconomice este înlocuită cu pornirea cu ajutorul motorului electric. În acest sens, motorul cu ardere internă va fi rotit uniform, printr-un control corespunzător al motorului electric, la o turație constantă de pornire. Printr-o comandă corespunzătoare a unghiului de deschidere a clapetei de accelerație a injectorului de combustibil, ambele pe bază de cartograme, motorul cu ardere internă va fi antrenat la turația de mers în gol, într-un regim de randament maxim, pâna când va fi capabil să mențină singur turația respectivă, iar sarcina motorului va crește în funcție de dorința conducătorului auto.

Aceste avantaje ale utilizării VEH, comparativ cu unul clasic alimentat cu aceeași energie sunt evidențiate prin bilanțul energetic descris în tabelul 8.4. Valorile date sunt aproximative și specifice unei anumite arhitecturi de vehicul hibrid. Așa cum s-a precizat anterior, vehiculele electrice hibride au fost proiectate având ca obiectiv primordial îmbunătățirea economiei de combustibil și reducerea nivelului emisiilor poluante la valori care nu pot fi atinse prin propulsia cu motor cu ardere internă, indiferent de soluțiile tehnologice utilizate.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Tabelul 8.4 Bilanț energetic pentru un VEH și un vehicul convențional

Sursa de energie/Consumator	Vehicul Electric hibrid- VEH	Vehicul conventional (motor cu ardere internă)
Combustibil	100	100
Pierderi în transmisie	-6	-6
Pierderi la funcționare în gol	0	-11
Pierderi în echipamentele auxiliare	-2	-2
Pierderi în motorul cu ardere internă	-30	-65
Recuperare prin frânare sau decelerare	+4	0
Total Energie rămasă	66	16

Deoarece, într-un vehicul electric hibrid, motorul cu ardere internă reprezintă principalul factor de scădere a randamentului, unul dintre obiectivele strategiei de control îl reprezintă forțarea funcționării motorului cu ardere internă doar în punctele de randament maxim și în regimuri stabile de lucru.

Un alt obiectiv, la fel de important, constă în controlul permanent al stării de încărcare și asigurarea încărcării sau descărcării bateriei astfel încât funcționarea ei să se realizeze în permanență cu randament maxim.

### **8.3.7. Criterii de clasificare a vehiculelor electrice hibride**

Cu toate că există o diversitate de soluții constructive a vehiculelor electrice hibride concretizate într-o serie de prototipuri sau de produse de serie comercializate cu succes, o clasificare generală a acestora se poate face, fie după modul de interconectare a celor două dispozitive de propulsie în cadrul liniei de tracțiune, fie după legătura dintre cele două surse de energie de la bord.

După modul de interconectare a celor două sau mai multe motoare în linia propulsoare, vehiculele electrice hibride se clasifică constructiv în trei categorii:

- 1.** vehiculul electric hibrid serie (VEHS), în care propulsia este asigurată de un singur convertor de energie, de regulă cel alimentat prin energie electrică;
- 2.** vehiculul electric paralel (VEHP) în care energia pentru propulsie este furnizată de două sau mai multe convertoare de energie, una primară (energie rezultată din arderea combustibililor fosili), respectiv una secundară sau auxiliară ( de regulă, energie electrică);
- 3.** vehiculul electric hibrid mixt (în configurație serie/paralel VEHSP) care, așa cum sugerează și denumirea, este o combinație a celor două configurații anterioare.

După interdependența dintre sursele de energie aflate la bord, vehiculele electrice hibride se pot clasifica în:

- a)** cele cu autonomie de funcționare extinsă utilizând energia electrică ca sursă primară pentru propulsie(Range-extender), *RE*

**b)** cele cu propulsia asigurată în principal de arderea combustibililor convenționali și susținută electric de la o sursă auxiliară de energie electrică (Power-Assist), *PA*

În categoria RE intră în principal vehiculele electrice hibride pentru care sursa primară de propulsie este sursa de energie electrică, pentru aceasta fiind necesare baterii de mare capacitate și gabarit, cu posibilitate de încărcare de la rețeaua locală de tensiune alternativă. Vehiculele hibride de tip RE funcționează în cea mai mare parte a timpului în mod ZEV (Zero-Emission-Vehicle). Energia pe bază de combustibil (benzină, motorină, metanol), se folosește pentru a extinde domeniul de autonomie al vehiculului prin refacerea stării de încărcare a bateriei, SOC, cu ajutorul unui convertor de energie( generator, alternator). Motorul cu ardere internă este de putere redusă, 5-20[Kw], suficient să propulseze vehiculul într-un trafic lejer la turație redusă, atunci când bateria este aproape de limita de descărcare pâna la o rețea electrică de reîncărcare. Există și posibilitatea opririi vehiculului și utilizarea motorului cu ardere internă ca sursă la bord pentru reîncărcarea bateriei. În configurația RE, motorul cu ardere internă împreună cu generatorul electric formează așa numita sursă auxiliară de putere. Deși nu se consideră sursa de înmagazinare a energiei electrice, caracteristicile respective sunt specifice unei configurații hibride serie cu transmisie electrica.

Vehiculul electric hibrid din categoria PA utilizează combustibilul convențional ca sursă primară de energie utilizată în propulsie. Energia electrică este destinată să preia vârfurile și să niveleze fluctuațiile ce rezultă în timpul propulsiei prin energia obținută din arderea combustibilului din rezervor. De regulă, un

vehicul electric hibrid din această categorie este un vehicul convențional propulsat printr-un motor cu ardere internă care folosește însă o linie propulsoare hibridă tocmai pentru a eficientiza utilizarea și distribuția energiei. Caracteristicile respective sunt specifice configurației hibride de tip paralel.

Testele practice au demonstrat că vehiculele proiectate astfel încât motorul cu ardere internă să poată prelua componenta continuă de putere, iar motorul electric să furnizeze diferența dintre vârfurile de putere și puterea motorului cu ardere internă rămâne varianta cea mai performantă de autovehicul ca eficiență și funcționare.

O altă clasificare a vehiculelor electrice hibride privită tot prin prisma schimburilor energetice se referă la posibilitățile de refacere la bord a stării de încărcare a bateriei raportată la o anumită autonomie de funcționare sau la un anumit test de deplasare standardizat. În conformitate cu acest criteriu, vehiculele hibride se pot clasifica într-una din următoarele două clase:

1. cu refacerea și menținerea stării de încărcare –CS, (Charge Sustaining). În acest caz un vehicul electric hibrid este astfel proiectat încât să fie capabil să-și mențină starea de încărcare corespunzătoare, în aproape toate condițiile de funcționare. Acesta este de altfel și obiectivul primordial al strategiei de control pentru un astfel de sistem hibrid. Strategia CS asigură menținerea stării de încărcare între două limite prestabilite, inferioară și superioară. Pentru a asigura o funcționare eficientă a bateriei și a preveni descărcarea accentuată sau chiar deteriorarea bateriei, limita inferioară se alege de regulă nu mai mică de 55% din starea maximă de încărcare, iar limita superioară aproximativ 60-70%

din valoarea maximă. De îndată ce limita minimă de încărcare a bateriei este atinsă, sistemul de control comută în starea de încărcare, în care o parte din puterea motorului cu ardere internă este utilizată pentru acționarea generatorului. După atingerea pragului superior de încărcare, sistemul de control comută din nou în regimul de partajare a cuplului. Referința la această categorie își are sens doar raportată la un anumit traseu de parcurs, de regulă un ciclu de testare standardizat;

**2. cu descărcarea continuă a bateriei, CD, (Charge Depletion).** În condițiile normale de lucru, nefiind posibilă menținerea stării de încărcare, propulsia vehiculului electric hibrid generează o “golire”, o epuizare progresivă a bateriei, astfel încât, atunci când starea de încărcare scade sub o anumită limită, reîncărcarea bateriei devine obligatorie. Reîncărcarea bateriei se poate face fie de la rețea, fie regenerativ din decelerări și frânări, fie prin sursa auxiliară de energie aflată la bord (APU-Auxiliary Power Unit). O menținere a stării de încărcare a bateriei la bordul unui astfel de vehicul nu ar fi un proiect practic (ca preț, ca gabarit, etc.).

Și în acest caz trebuie făcută o precizare: există moduri de funcționare de tip CS sau CD, respectiv arhitecturi hibride de tip CS sau CD, dar utilizarea acestor termeni trebuie făcută cu prudență. Se poate astfel afirma că modul de funcționare fără poluare, ZEV, este un mod de descărcare continuă a bateriei.

Modurile de funcționare ale vehiculelor electrice hibride sunt elemente ale strategiei de gestionare a resurselor energetice de la bord. După cum s-a aratat anterior, un vehicul electric hibrid poate dispune de un anumit set de moduri de funcționare, de exemplu: cel specific vehiculelor propulsate clasic prin motor cu ardere internă, cel specific vehiculelor electrice având emisii nule,



(ZEV), cu refacerea continuă a stării de încărcare de tip CS, cu reducerea continuă a încărcării bateriei de tip CD, cu recuperarea energiei cinetice (frână recuperativă), sau cu un consum redus de putere, precum și multe altele.

Din punct de vedere constructiv însă, un vehicul electric hibrid poate fi de tip CS sau CD. Astfel, vehiculul electric hibrid cu posibilități de refacere “on-line” a încărcării bateriei, adică de tip CS, poate funcționa în modul CD cu descărcare continuă a bateriei. Tranziția dintre modul CS și modul CD va depinde doar de necesitățile energetice specifice unui anumit ciclu de parcurs și de posibilitățile specifice ale componentelor electrice de generare și consum al sarcinii aflate la bord. Important este faptul că pe ansamblu, bateria nu se va descărca sub limita bunei funcționări, indiferent de regimul de funcționare.

Totuși, un vehicul electric hibrid proiectat ca CD (de exemplu de tip ZEV) nu poate funcționa oricând cu refacerea stării de încărcare a bateriei, decât numai în situațiile în care solicitările energetice ale propulsiei sunt reduse.

Propulsiile hibride pot fi clasificate și după alte criterii, mai puțin importante printre care se pot aminti cele legate de tipul motorului cu ardere internă utilizat, respectiv după localizarea celor două motoare, motorul cu ardere internă și motorul electric în raport cu transmisia finală. Ultimul caz se referă de fapt la plasarea motorului electric, fie de aceeași parte cu motorul cu ardere internă ca intrare în transmisia finală, fie după transmisie, aceasta din urmă acționând efectiv doar asupra motorului cu ardere internă. Deoarece configurațiile respective sunt specifice strict modului hibrid paralel, ele vor fi tratate în paragraful ce descrie arhitectura respectivă.

### **8.3.8. Baterii, pile de combustie si supercondensatoare utilizate pe vehicule electrice hibride**

#### **8.3.8.1. Baterii cu plumb**

Bateriile cu plumb se compun din celule electrochimice care conțin un pol pozitiv, un pol negativ și un electrolit, toate dispuse într-un vas corespunzător (dintr-un material neatacabil de acidul sulfuric). Materia activă de la polul pozitiv este bioxidul de plumb ( $\text{PbO}_2$ ) iar materia activă de la polul negativ este plumbul spongios. La descărcare, atât bioxidul de plumb cât și plumbul spongios se transformă în sulfat de plumb, iar la reîncărcare, materiile active revin la starea inițială. În general electrozii sunt sub formă de plăci de tip grătar, sac sau tubulare.

Electrolitul este o soluție de acid sulfuric  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de concentrație 20-30% sau densitate cuprinsă între 1,08 și 1,300  $\text{g/cm}^3$ . Plăcile pozitive sunt legate între ele, formând electrodul pozitiv, iar plăcile negative sunt și ele legate între ele, formând electrodul negativ.

Pentru ca rezistența internă să fie cât mai mică, plăcile trebuie să fie cât mai apropiate, dar fără riscul de scurtcircuit. Astfel, între plăci de semn contrar se montează piese separatoare poroase (din lemn, plastic, cauciuc, ebonite, etc.), care au rolul de a împiedica atingerea plăcilor.

În plus, în acest fel se obține un volum cât mai mic și se obține și un pachet bine fixat în vas, ceea ce preîntâmpină deformarea plăcilor. Tensiunea dată de o celulă este de aproximativ 2 V.

### Procesele electrochimice din bateriile cu plumb

În timpul încărcării și descărcării, procesele electrochimice reversibile sunt explicate prin teoria dublei sulfatări. La descărcare, reacțiile au loc între materia activă a plăcii pozitive ( $\text{PbO}_2$ ), acidul sulfuric ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), și materia activă a plăcii negative ( $\text{Pb}$ ), reacția totală fiind

descărcare



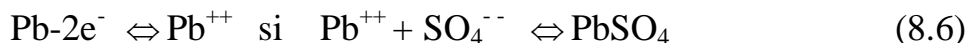
încărcare

Ecuatie în care de la stânga la dreapta au loc reacțiile la descărcare iar de la dreapta la stânga au loc reacțiile de încărcare.

Reacția la electrodul negativ este



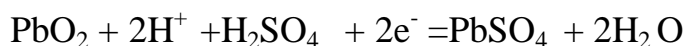
sau



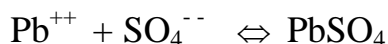
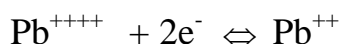
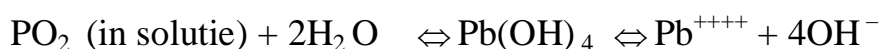
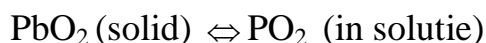
La descărcare, bioxidul de plumb de la anod se reduce, atomul de plumb trece de la electrod în soluție sub formă de ion pe electrod rămânând două sarcini negative libere (doi electroni) iar plumbul se combină cu ionul  $\text{SO}_4^{2-}$  al unei molecule de acid sulfuric și formează sulfatul de plumb  $\text{PbSO}_4$  care, din cauza solubilității sale mici, se depune pe electrod. Molecula de oxigen  $\text{O}_2$  rămasă de la bioxidul de plumb se combină cu ionii de hidrogen  $\text{H}^+$  ai celor două molecule de acid sulfuric, alcătuind două molecule de apă. Apariția apei face ca densitatea electrolitului să scadă în timpul descărcării. La electrodul pozitiv la descărcare bioxidul de plumb trece în soluție, formând hidrat de plumb tetravalent, care se disociază. Plumbul tetravalent primește

prin circuitul exterior cei doi electroni eliberați de la anod și trece în plumb bivalent, care în prezența ionilor  $\text{SO}_4^{2-}$  se transformă în sulfat de plumb și se depune pe electrod. La încărcare fenomenele decurg în sens invers.

Reacția la electrodul pozitiv este:



sau, dezvoltând:



### Tensiunea celulei

Tensiunea celulei rezultă din diferența potențialelor celor doi electrolizi față de electrolit. În cazul cuplului galvanic Pb-PbO<sub>2</sub> potențialul dominant este cel al electrodului pozitiv, potențial care crește cu densitatea electrolitului, tensiunea electromotoare crescând astfel liniar cu densitatea. O formulă empirică aproximativă este

$$E = 0,84 + d,$$

unde  $d$  reprezintă densitatea exprimată în  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ . Tensiunea electromotoare variază cu temperatura, reacțiile electrochimice fiind mai puternice la temperaturi ridicate. Tensiunea  $U$  la bornele celulei (tensiune utilizată în circuitul exterior) este dată de relațiile  $U_b = E - E_p - I_r$ , respectiv  $U_{\text{înc}} = E + E_p + I_r$

### Caracteristicile $U=f(t)$ la încărcare și descărcare

Tensiunea la borne la descărcare variază în funcție de curent și de timp. În figura 8.27 s-a reprezentat variația în timp a tensiunii la borne pentru o celulă care este descărcată în 5 ore. Din figură se observă că în timp tensiunea scade tot mai mult, iar după valoarea de 1,8 [V] scade repede către zero. Acest lucru se datorează sulfatării care reduce continuu porozitatea materiei active și împiedică difuziunea, densitatea electrolitului devenind și ea tot mai mică. La descărcări lente cu curenți mici (curba de descărcare pentru 5 ore), difuziunea poate să aducă acidul necesar descărcării, adânc și uniform în toată materia activă; cantitatea de acid este mare, densitatea electrolitului scade lent iar tensiunea scade și ea lent.

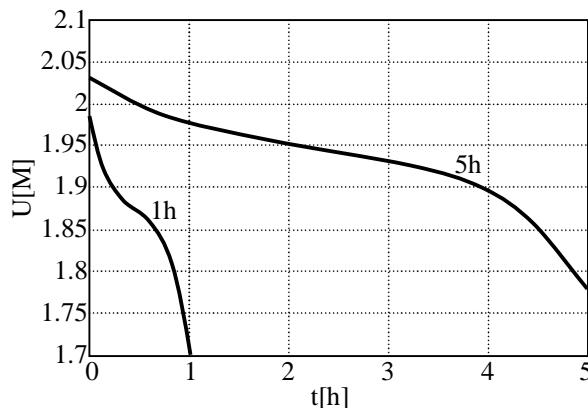


Figura 8.27 Descărcarea pentru o baterie cu plumb

În cazul descărcărilor rapide, cu curenți mari, difuziunea asigură acidul sulfuric necesar doar la suprafața plăcilor unde are loc o sulfatare intensă, ceea ce provoacă micșorarea porozității materiei active și de aici a difuziunii, scăzând concentrația electrolitului și deci tensiunea electromotoare. De aceea, curba de variație a tensiunii are o pantă mult mai mare, iar tensiunea limită

la care trebuie oprită descărcarea este atinsă mai repede. De notat că după descărcări prelungite cu curenți mici până la tensiunea minimă admisă, bateria este complet descărcată și trebuie reîncărcată, iar la descărcări cu curenți mari, de șoc, nu se produc sulfatări importante și materiile active mai pot participa la reacții. În cazul descărcărilor lente (de peste opt ore) tensiunea pe element nu trebuie să coboare sub 1,8V, iar la descărcări rapide de ordinul minutelor (cum este cazul în general la vehiculele electrice hibride) tensiunea pe element poate fi acceptată până la 1,33 V. Nu este recomandată utilizarea unor cicluri de descărcare mari, o descărcare aproape totală ducând la o suprasolicitare, fiecare ciclu ducând la pierderea unei părți din capacitatea bateriei.

Se pot exemplifica mai multe cazuri de descărcare a bateriei normală, controlată, parțială sau de șoc.

- Descărcarea normală este o descărcare completă la regimul nominal al bateriei, efectuată la curent normal constant și care poate dura câteva ore. Această situație nu se întâlnește însă în cazul vehiculelor, unde sarcinile pot varia mult într-un timp scurt.

- Descărcarea controlată se realizează în condiții de laborator pentru determinări de capacitate sau randament.

- Descărcarea parțială este o descărcare oprită la 0,75-0,8 din capacitatea nominală urmată de o încărcare parțială și este un regim de lucru specific pentru autovehicule. Ea are avantajul că nu duce la solicitarea adâncă, repetată a materiei active.

- Descărcarea de șoc este și ea specifică bateriilor utilizate pe vehicule, apărând la pornire sau la existența unor sarcini mari. În acest caz bateria debitează curenți mari iar tensiunea scade repede pe celule (cu 20-25% în doar câteva minute)

La încărcare, tensiunea pe celulă crește repede în primul interval, apoi începe faza principală a încărcării în care tensiunea crește lent. După depășirea tensiunii de circa 2,2V începe o degajare de gaze pe electrolizi și tensiunea crește relativ repede pâna spre 2,6-2,8V când devine staționară.

După ce se depășește tensiunea de 2,4V, are loc fenomenul de electroliză a apei. Acesta apare deoarece tensiunea la borne se însumează cu tensiunea electromotoare de polarizare, iar gazele degajate agită electrolitul în mod asemănător unei fierberi. Fierberea (efectul vizibil al electrolizei) se manifesta întâi la plăcile negative și apoi la cele pozitive. Spre finalul încărcării, materia activă este desulfată, curentul nu mai este utilizat de plăci și realizează doar electroliza apei, tensiunea fiind stabilizată la circa 2,7-2,8V. În figura 4.11 s-a prezentat încărcarea lentă (în 10 ore) și o încărcare rapidă (în 3 ore) .

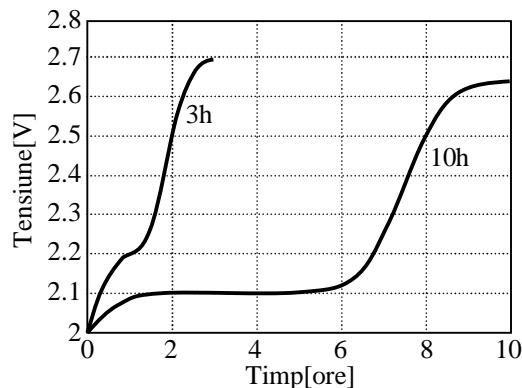


Figura 4.11 Caracteristici de încărcare pentru o baterie cu plumb

Încărcarea la o tensiune ideală este dificilă, orice tensiune reprezentând un compromis. Astfel, o tensiune superioară, 2,4[V/celulă], va genera o baterie cu performanțe bune, dar cu durata de viață mai mică datorită coroziunii electrodului pozitiv

(coroziunea fiind permanentă). O tensiune sub 2,4[V] este caracterizată de dezavantajul sulfatării la electrodul negativ. După deconectarea bateriei de la sursa de încărcare, tensiunea la borne tinde să scadă puțin, până la o valoare staționară.

La încărcare cu curenți prea mari sau dacă rezistența internă este foarte mare (datorită unei sulfatări puternice), este posibil ca fierberea să înceapă chiar de la începutul încărcării, ceea ce arată că procesul de încărcare este neînsemnat sau nul.

Specific vehiculelor electrice hibride este frânarea electrică recuperativă, când curentul de frânare încarcă bateria. În general frânările sunt scurte și foarte scurte (zeci de secunde sau chiar câteva secunde), curenții având valoare ridicată. Pentru a evita o degajare puternică de gaze este necesar în acest caz un control și un reglaj continuu al curentului.

Temperatura influențează semnificativ procesele de încărcare și descărcare. O temperatură mai mare duce la tensiuni mai mari și la durate mai mari de descărcare, sulfatarea fiind mai pronunțată iar cantitatea de energie debitată fiind mai mare (figura 8.28). La încărcare, o temperatură ridicată limitează însă tensiunea pe celulă și durata încărcării este mai mare (figura 8.29),

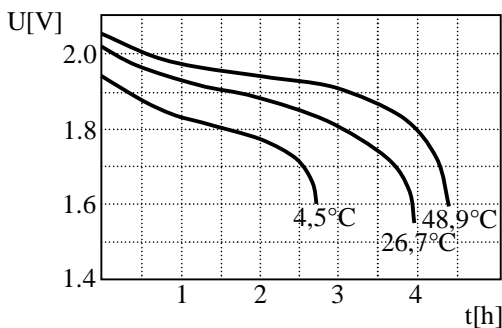


Figura 8.28. Variația tensiunii la descărcare

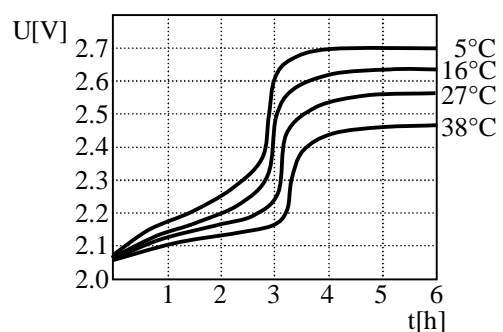


Figura 8.29 Variația tensiunii la încărcare



## Capacitatea bateriilor cu plumb

Capacitatea este influențată de toți factorii care intervin în funcționarea bateriei: a) cantitate materie activă, b) porozitatea materiei active, c) concentrația și temperatura electrolitului, d) difuziunea, e) intensitatea curentului, f) tensiunea la borne, etc.

### *a) Cantitatea de masă activă*

Pentru 1 Ah sunt necesari 3,866[g] de plumb. Tot pentru 1 Ah sunt necesari 4,463[g] de masă activă pozitivă (bioxid de plumb). În realitate cantitățile necesare sunt de două ori mai mari (bateria trebuie să asigure capacitatea nominală și la 50% uzură), rezultând că 24,987g de plumb în plăci corespund la 1 [Ah] capacitate. Tot pentru 1[Ah] sunt necesari circa 15-20cm<sup>3</sup> de electrolit de fiecare celulă, din care cel puțin 1/3 se află îmbibat în plăci și separatoare.

### *b) Grosimea și porozitatea plăcilor*

Dacă plăcile sunt subțiri suprafața de contact a materiei active cu electrolitul este mai mare decât la plăci groase. În plus, plăcile subțiri dau o rezistență internă mai mică și permit curenți mai mari. Cu cât plăcile sunt mai poroase cu atât suprafața de contact a electrolitului crește și crește masa de materie activă care intră în reacție.

### *b) Concentrația și temperatura electrolitului*

Cu cât densitatea este mai mică, cu atât electrolitul asigură o capacitate mai redusă. Cu cât temperatura electrolitului este mai mare, rezistența internă scade, difuziunea este mai bună și electrolitul pătrunde mai bine în placă iar capacitatea crește.

## **Randamentul bateriilor cu plumb**

Randamentul bateriei este dat de raportul dintre energia restituită și energia primită sau de raportul ( $Ah$  la descărcare) / ( $Ah$  la încărcare). Valorile uzuale de randament pentru bateriile cu plumb sunt de 0,65 până la 0,75, dar poate ajunge și la 0,84. Valoarea inversă a randamentului se numește factor de încărcare și reprezintă pierderile din baterie.

## **Durata de viață a bateriilor cu plumb**

Dacă nu există alte referințe, durata de viață este considerată până la momentul în care capacitatea bateriei se reduce la 0,8 din capacitatea nominală ( $C_{nom}$ ), iar pentru vehicule se acceptă până la 0,7 din  $C_{nom}$ .

Durata de viață poate fi exprimată în cicluri de încărcare-descărcare dar și în ani de serviciu, caz în care se are în vedere și timpul de păstrare a bateriei. În funcție de tipul și modul de utilizare a bateriei, numărul de cicluri poate varia de la 200 până la circa 700. Numărul de încărcări-descărcări este de circa  $200 \div 300$  (când descărcarea este de până la 80%) sau de circa  $400 \div 500$  (când descărcarea este de până la 50%), numărul fiind mai mic la temperaturi de lucru mari.

În ceea ce privește temperatura medie, optimul este de  $25^{\circ}C$ , o creștere de temperatură cu  $8^{\circ}C$  reducând viața bateriei la jumătate. De asemenea, performanțele la temperaturi joase sunt slabe. Durata de viață depinde de fenomenele din baterie aproximativ astfel: 35% din uzură se datorează coroziunii grătarelor plăcilor pozitive sau a miezului de plumb din plăcile

pozitive, circa 30% se datorează defectelor de izolație dintre plăci și problemelor de etanșeitate, circa 15% desprinderii și căderii materiei active pozitive, 20% altor cauze.

### **Autodescărcarea bateriilor cu plumb**

Coeficientul de autodescărcare este redus față de alte baterii (circa 40% pe an). Bateria trebuie stocată întotdeauna în stare încărcată, în caz contrar apărând fenomenul de sulfatare, ceea ce face dificilă sau chiar imposibilă reîncărcarea și deci utilizarea sa. Autodescărcarea se datorează în principal: prezenței impurităților metalice și reacției secundare dintre electrolit și plumbul spongios al plăcii negative (reacție proporțională cu temperatura și densitatea electrolitului). În cazul unor perioade mai lungi de repaus (și dacă bateria nu este reîncărcată), apare procesul de sulfatare: sulfatul de plumb format la descărcare (aflat sub formă de cristale fine active apte de reactivare) suferă un proces de recristalizare și trece în stare de cristale mari, inactive, care obturează porii și împiedică reactivarea straturilor mai adânci ale plăcii și sulfatul nu mai poate fi readus în bioxid de plumb și plumb spongios. Desulfatarea implică încărcări repetate la curenți mici (deci de lungă durată), sau chiar curățirea mecanică a plăcilor.

### **Dezavantajele bateriilor cu plumb**

Energia specifică redusă (circa 40 Wh/kg), puterea specifică redusă (maximum 300 W/kg), eficiența redusă la temperaturi mici și numărul de cicluri relativ mic reprezintă impedimente în

utilizarea lor pe vehicule electrice hibride. Nu pot fi stocate în starea de descărcare, fiind recomandat ca tensiunea pe celulă să nu scadă sub circa 2V. Caracteristicile de încărcare și descărcare depind semnificativ de variațiile de temperatură. Au dezavantajul că necesită o durată mare de reîncărcare (de pâna la 6-8 ore). Bateria nu poate susține un curent mare sau o tensiune de încărcare pentru o durată mare de timp, bateria se încălzește repede și se răcește lent. O încălzire a bateriei duce la fenomenul de eliberare a hidrogenului și la reducerea eficienței.

Masa bateriilor cu plumb folosite pentru vehicule electrice sau hibride este mare și poate ajunge până la 24% din masa vehiculului. Din punct de vedere al protecției mediului, bateriile cu plumb sunt poluante atât datorită plumbului cât și datorită electrolitului. Producerea lor implică existența unui mediu toxic cu efecte negative pentru personal și pentru mediu. Transportul lor trebuie realizat cu grijă pentru a se evita scurgerile de acid.

### **Avantajele bateriilor cu plumb**

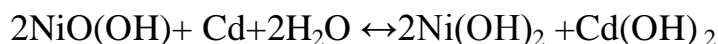
Bateriile cu plumb pot fi realizate la puteri mari, sunt ieftine, simplu de realizat, sigure și fiabile. Tehnologia producerii lor este bine stăpânită, iar utilizarea lor corectă asigură un serviciu durabil și eficient. Au o mare capacitate de descărcare.

#### **8.3.8.2. Baterii nichel-cadmiu**

Acestea sunt baterii alcaline secundare, la care elementele de bază sunt electrodul pozitiv din hidroxid de nichel  $\text{Ni(OH)}_2$ , electrodul negativ din cadmiu și un electrolit din hidroxid de

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

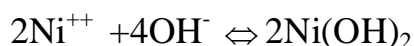
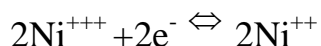
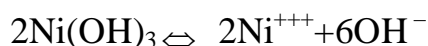
potasiu KOH ( cu densitate de  $1,210\text{g/cm}^3$ ). Electrolitul acționează ca un conductor ionic și intervine puțin în reacții. Procesele electrochimice reversibile din timpul încărcării și descărcării sunt date de reacția totală :



La electrodul pozitiv reacția este



sau dezvoltând

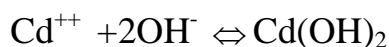
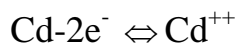


Potențialul la electrodul pozitiv este de circa 0,45-0,5V.

La electrodul negativ reacția este



sau



unde NiO(OH) este oxihidroxidul de nichel, iar Cd(OH)<sub>2</sub> este hidroxidul de cadmiu.

Potențialul la electrodul negativ este de circa 0,8[V]. Tensiunea electrică pentru un element este de circa 1,2-1,3 [V]. Din punct de vedere constructiv (figura 8.30), o baterie de NiCd este compusă din electrodul pozitiv izolat de electrodul negativ (din cadmiu) printr-un separator, elementele fiind dispuse în straturi și rulate sub formă de spirală, acestea, împreună cu electrolitul, fiind asamblate într-o carcasă metalică. Bateria dispune de o supapă de siguranță care asigură evacuarea gazelor care pot fi eliberate în timpul funcționării. Necesită o descărcare

completă periodică pentru a evita apariția efectului de memorie. Se comportă bine la încărcări rapide.

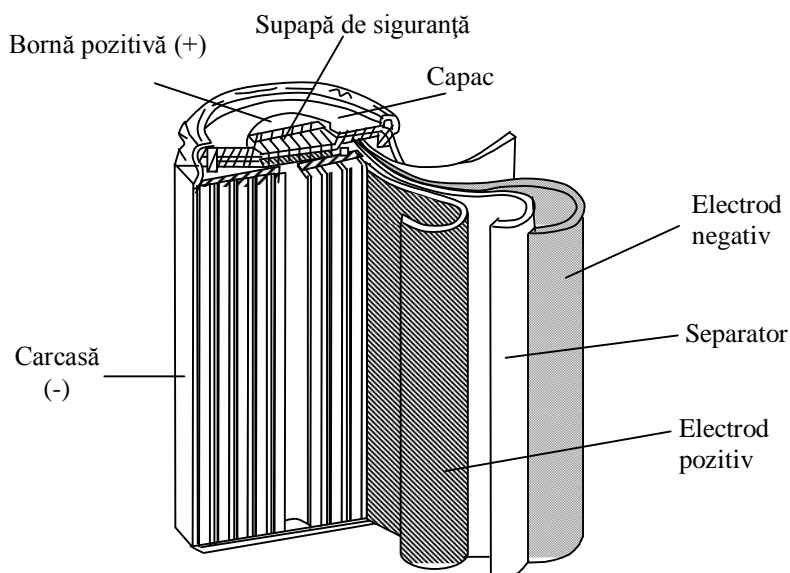


Figura 8.30 Structura unei baterii NiCd

**Avantaje:** durata de viață este relativ mare, de circa 1000 cicluri (valoare medie 500 de cicluri), poate fi reîncărcată și la temperaturi reduse, sunt simplu de stocat și transportat, lucrează bine și la temperaturi reduse, pot lucra la o rată de descărcare mare, încărcarea se poate face rapid, în cel mult două ore sau chiar în 15 minute, sunt reciclabile.

**Dezavantaje:** au densitate de energie redusă (45-80W/kg), valoare medie de 55W/kg, grad de autodescărcare ridicat (circa 10% în 24-48 ore sau circa 20-25% pe lună și se descarcă aproape complet în 6 luni), cadmiul este toxic, prezintă efectul de memorie, sunt de 2-4 ori mai scumpe decât bateriile cu plumb (dar au durata de viață mai mare). Lucrează cel mai bine pe plaja de

temperaturi dintre 16 și 26 grade Celsius, capacitatea lor scăzând la temperaturi mari.

Bateriile NiCd au o rezistență internă redusă, ceea ce le face utile pentru echipamentele în care se solicită valori mari de curent, ajungând până la 20[A/celula]. Există unele opinii legate de efectul de memorie, care înseamnă tendința bateriei de a nu genera tensiunea nominală dacă este conectată la sarcină înainte de descărcarea totală (până la circa 1[V/cel]). Efectul constă în apariția unor granule datorită cadmiului “nefolosit”, ceea ce reduce suprafața activă a cadmiului; electrodul de cadmiu va avea astfel două suprafețe cu rugozitate diferită; la sarcini mari, suprafața mai fină se va consuma rapid, ceea ce duce la scăderea tensiunii, deși bateria nu este descărcată. Cataloagele firmelor nu menționează acest efect, iar unii utilizatori consideră că această descărcare reduce durata de viață a bateriei. Din acest motiv se recomandă ca periodic bateria să fie descărcată total.

Un alt efect este cel numit reversarea celulei: el apare când bateria este descărcată sub 1[V/cel], când una din celule se poate descărca înaintea celorlalte. Curentul generat de celule rămase active vor încărca celula descărcată, dar cu polaritate inversă, ceea ce poate duce la eliberare de gaz, și la defectarea ireversibilă a bateriei. Densitatea de stocare a energiei este de 45-80Wh/kg, iar densitatea de putere este de 150-160 W/kg. Randamentul în [Ah] al bateriilor NiCd este de circa 75-80% iar randamentul în [Wh] este de circa 60-65%.

Din punct de vedere al poluării, acest tip de baterie este poluantă, dar este reciclabilă. Caracteristicile de încărcare depind de curent, timp, temperatură: un curent de încărcare crescut și o temperatură redusă duc la creșterea tensiunii bateriei.

În figura 8.31 se prezintă caracteristici de autodescărcare iar în figura 8.32 se prezintă caracteristici de încărcare în funcție de temperatură pentru baterii NiCd.

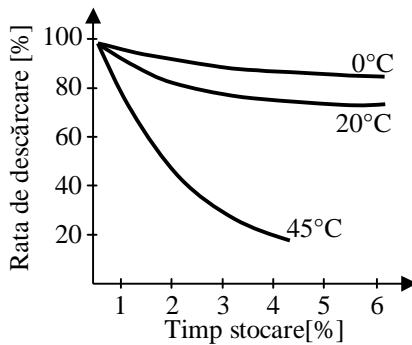


Figura 8.31 Caracteristici de autodescărcare

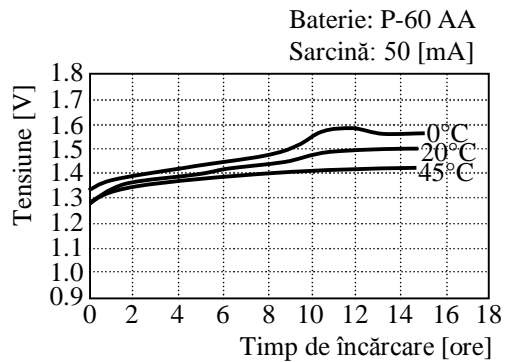


Figura 8.32 Caracteristici de încărcare

### 8.3.8.3. Bateriile nichel metal hibrid (NiMH)

În domeniul bateriilor nichel metal hibrid (NiMH), cercetările au început în anii '70 în urma cercetărilor asupra modalităților de stocare a hidrogenului, când s-a observat că unele aliaje metalice (NiFe, MgNi), au capacitatea de a captura și elibera un volum de hidrogen de până la 1000 de ori mai mare decât volumul lor. Prin alegerea corespunzătoare a materialelor constitutive, procesele electrochimice pot fi controlate la temperatura mediului ambiant. Deoarece aliajele metal hibrid erau instabile în structura celulelor electrochimice, dezvoltarea bateriilor NiMH s-a produs spre sfârșitul anilor '80. Ca structură sunt în general similare cu bateriile NiCd, diferind prin faptul că



În loc de cadmiu se folosește ca element activ hidrogenul. Anodul este realizat dintr-un material hibrid, care are capacitatea de a stoca hidrogen. Tensiunea unei celule este de 1,2V. Din punct de vedere constructiv, structura unei celule de baterie NiMH este clasică, fiind compusă din doi electrozi și un electrolit (figura 8.33).

**Electrodul pozitiv** este hidroxidul de nichel  $\text{Ni(OH)}_2$ . El este insolubil în electrolit și poate fi realizat cu suprafețe mari, ceea ce duce la capacitate ridicată și densități mari de curent.

**Electrodul negativ** este realizat dintr-un material hibrid, care, în structura sa, stochează hidrogen. Metalul hibrid poate conține teoretic între 1% și 7% hidrogen din masa sa (materialele actuale utilizate conțin 1% sau 2% hidrogen). Substratul metalic poros utilizat este de tip grătar, rețea, folie, spongios, sau placă. Metalul poros utilizat în construcția substratului se realizează din nichel, cupru, cupru placat cu nichel, sau aliaj de cupru-nichel. Deși cuprul rezistă la coroziunea reacțiilor de hidurare, creșterea solicitărilor și protecția suplimentară a electrozilor de mediul chimic coroziv din interiorul bateriei impune acoperirea cu un strat superprotector din metal precum nichelul.

Utilizarea cuprului în aliaj, cu excelente calități de conductibilitate electrică, reduce considerabil rezistența internă a electrodului și micșorează pierderile de putere prin disipare termică, crescând astfel puterea disponibilă a bateriei. În plus, cuprul este un metal maleabil, caracteristică importantă dacă se ia în considerare faptul că într-un ciclu de încărcare/descărcare electrodul se dilată, respectiv se contractă (dar nu termic).

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

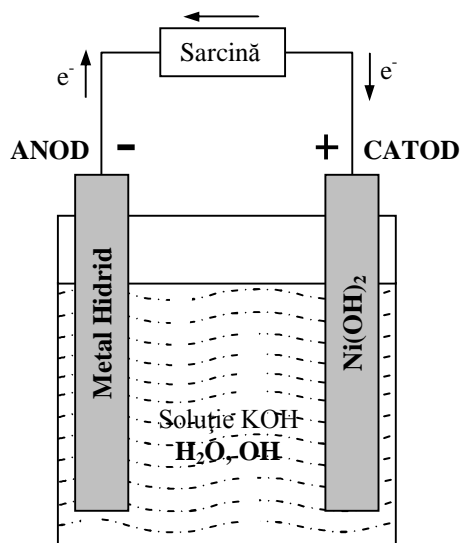


Figura 8.33 Baterie NiMH

Maleabilitatea crescută a substratului previne astfel fisurarea sau sfărâmarea electrodului măbind durata de funcționare și fiabilitatea bateriei. Electrocul negativ rezultă prin presarea materialului activ (aflat sub formă de pulbere) în masa substratului metalic poros, după ce se sinterizează.

Pentru a permite o păstrare sigură a materialului activ și o creștere suplimentară a conductibilității electrice, după presarea pulberii pe substrat și eventuala sintetizare, acesta se plachează cu o folie ultrafină de cupru. Această placare poate permite renunțarea la operația de sinterizare scumpă, reducând astfel costul de fabricație .

Materialul activ este de regulă un aliaj Titan-Vanadiu-Nichel la care se adaugă Pd (Paladiu) având rolul de a crește semnificativ capacitatea de descărcare la rate mari. Astfel, rata de descărcare 1C se îmbunătățește cu 20% comparativ cu cea a aceluiași metal activ fără adaos de paladiu. Compoziția pulberii

active este specifică și se notează diferit de fiecare fabricant de baterii.

Firma Matsushita Panasonic utilizează în pasta activă amestecuri de pământuri rare precum lantan sau altele din grupa acestuia, aliajul de  $\text{LaNi}_5$  fiind denumit codificat AB5. O altă firmă foarte cunoscută, Texaco Ovonic utilizează pentru pasta activă aliaje din Ti (Titan), Zr (Zirconiu), V (Vanadiu), Cr (Crom), Mn (Mangan) cu sau fără Pd (Paladiu). Compoziția unui aliaj pe bază de metale rare este prezentată în tabelul 8.5.

Tabelul 8.5 Compoziția pastei active pe bază de aliaj din pământuri rare (Misch metal=Mm)

Codificare Aliaj	La	Ce	Pr	Nd	Ni	Co	Nm	Al	Capacitate descărcare
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mAh/g]
<i>Mm-M</i>	10.5	4.3	0.5	1.4	60	12.7	5.9	4.7	250

Îmbunătățirea semnificativă pe care un procent infim de paladiu o aduce capacității de descărcare a bateriei NiMH reiese și mai bine în evidență din figura 8.34 în care sunt reprezentate caracteristicile de descărcare (curentul de descărcare raportat la capacitatea bateriei) pentru patru tipuri sugestive de aliaje.

Astfel, se poate observa comportamentul a doua aliaje, Z212, respectiv Z151 ce diferă doar prin adaosul 1% Pd la primul aliaj și care face ca la o descărcare 1C capacitatea acestuia să scadă cu doar 10% (curba a) în timp ce lipsa paladiului produce o scădere cu 75% a capacității celui alt aliaj (curba b) pentru același curent de descărcare.

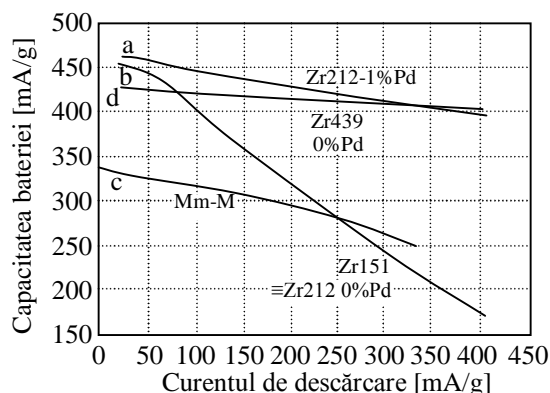


Figura 8.34 Rata de descărcare a unor aliaje utilizate la fabricația electrozilor negativi pentru baterii NiMH- Influența adaosului de paladiu

**Electrolitul** este o soluție apoasă de hidroxid de potasiu KOH; are o conductivitate electrică ridicată și în general nu intră în reacție cu vreun material. Concentrația electrolitului rămâne constantă pe toata durata încărcării sau descărcării, ceea ce duce la puteri mari și o lungă durată de viață. În plus, masa electrolitului rămâne constantă, și nu este necesară refacerea ei în timp.

Procese electrochimice din bateriile NiMH sunt reversibile și decurg astfel:

## Încărcare

Energia chimică este stocată într-o legătură oxigen-hidrogen în electrodul de hidroxid de nichel  $\text{Ni(OH)}_2$ . La încărcare, energia electrică este folosită pentru a rupe legătura oxigen-hidrogen în hidroxidul  $\text{Ni(OH)}_2$ . La electrodul pozitiv, cu ajutorul unui ion

OH<sup>-</sup> din electrolit, se formează oxihidroxidul de nichel NiOOH și o moleculă de apă și se eliberează un electron .

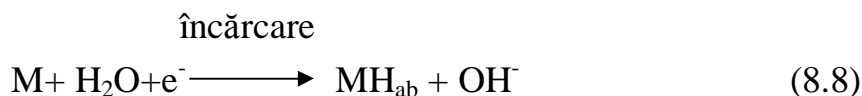
La electrodul negativ molecula de apă este ruptă într-un ion OH și hidrogen acesta din urmă fiind intercalat în rețeaua metalului, formând metalul hibrid.

Deoarece transportul electronilor este foarte rapid iar cel al ionilor mai lent, este necesară o rezervă de ioni OH<sup>-</sup>, aceasta fiind furnizată de către electrolitul constituit din hidroxid de potasiu KOH. Astfel, la încărcare, hidrogenul se deplasează de la electrodul pozitiv la cel negativ.

Reacția chimică la electrodul pozitiv are un potențial electric de circa 0,5V și este dată de



Reacția chimică la electrodul negativ are un potențial electric de circa 0,8 V și este dată de



unde MH<sub>ab</sub> reprezintă metalul hibrid, H<sub>ab</sub> este hidrogenul absorbit, iar M reprezintă aliajul de metal folosit pentru electrodul negativ.

Din diferența algebrică a celor două potențiale rezultă că tensiunea electrică pentru o celulă este astfel de circa 1,3 V.

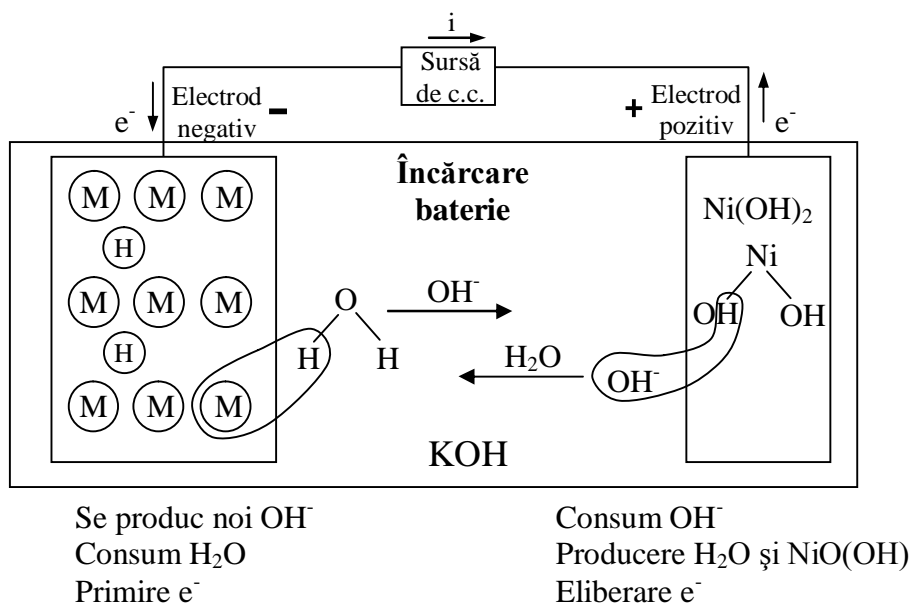


Figura 8.35 Reacțiile electrochimice - încărcarea bateriilor NiMH

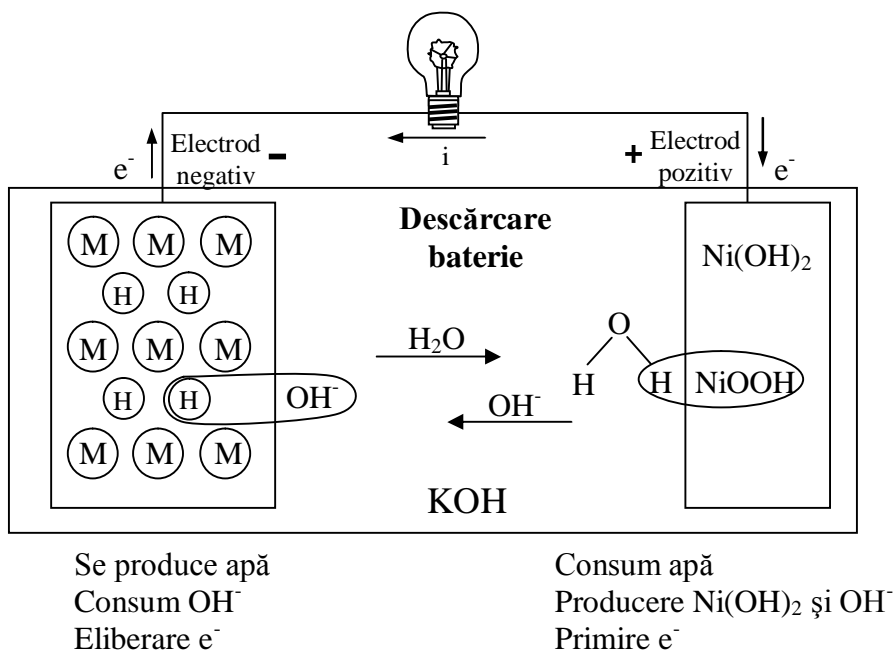


Figura 8.36 Reacțiile electrochimice - descărcarea bateriilor NiMH

## Descărcare

La descărcare reacțiile sunt inversate iar energia chimică stocată este eliberată sub formă de energie electrică. La electrodul negativ, hidrogenul stocat în metalul hibrid este eliberat și intră în reacție cu un ion  $\text{OH}^-$  formând o moleculă de apă și eliberând un electron în circuitul exterior. La electrodul pozitiv este primit electronul din circuitul exterior, iar molecula de apă este ruptă într-un ion  $\text{OH}^-$  și hidrogen, acesta din urmă fiind intercalat în electrod și se formează hidroxidul de nichel  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ .

Reacția totală este

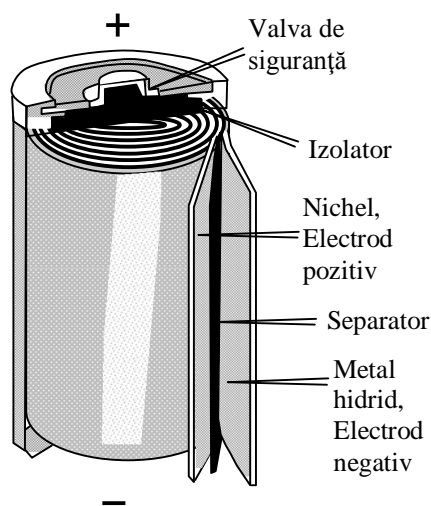
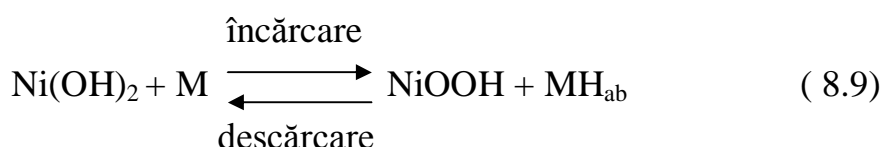


Figura 8.37 Baterie NiMH- cilindrică

Bateriile NiMH pot fi realizate practic la orice dimensiune, de la zeci de Ah la sute de Ah. Datorită compatibilității oțelului cu

electrolitul KOH, bateria poate fi realizată în cutii de oțel, care sunt rezistente și au performanțe termice bune. Din punct de vedere constructiv o celulă tipică cilindrică (figura 8.37) este realizată astfel: materialul electrodului activ este realizat sub formă de foi subțiri (sub 1 mm) pe un substrat metalic conductor. Electrolizii sunt realizați sub formă de straturi izolate cu un separator, ansamblul fiind spiralat și introdus într-o carcasă standardizată. Electrocul negativ este legat electric la carcasă, iar cel pozitiv este izolat electric de carcasă. În mod similar sunt realizate și bateriile prismatice. Bateriile cilindrice au avantajul că rezistă mai bine la presiunea internă. Datorită posibilității de creștere a presiunii interne datorită gazelor, de obicei bateria are o valvă de gaz.

Avantajele bateriilor NiMH ar fi :

- conductivitate înaltă a electrolitului, ceea ce permite utilizarea în aplicații de putere mare,
- bateria poate fi închisă/etanșeizată, minimizând costurile de întreținere și pierderile, operează pe o plajă largă de temperaturi,
- durata de viață este mare și compensează costul mai mare față de alte tehnologii,
- densitatea de energie este mare iar costul pe watt sau pe watt-oră este redus.

### **Materialele hibride**

Acestea au devenit aplicabile, după realizarea compușilor metalici care combină materiale hibride puternice și slabe. Ajustând raportul dintre componente se obține un metal hibrid cu



proprietățile necesare (rezistență la coroziune, stabilitate mecanică, reversibilitate, capacitate de stocare a hidrogenului) și care au capacitatea de a absorbi hidrogen echivalent cu de circa 1000 ori volumul lor și apoi de a elibera acest hidrogen. Materialele sunt împărțite în grupuri clasificate  $A_xB_y$  pe baza compoziției și a structurii lor cristaline. Aliajele combină metalul (A) ai cărui hibridi generează căldura exotermic cu metalul (B) ai cărui hibridi generează căldura endotermic pentru a produce energia necesară absorbției și eliberării hidrogenului la temperaturi și presiuni normale. În prezent accentul se pune pe aliajele  $AB_5$  în care se folosesc pământuri rare, în special metale din grupa lantanidelor precum și pe aliajele  $AB_2$  bazate pe titan și nichel. În tabelul 8.6 se prezintă unele dintre cele mai uzuale metale hibride folosite pentru baterii [24].

Tabelul 8.6 Tipuri de metale hibride

Clasa $A_xB_y$	Componente	Observații	Capacitate de Stocare [mA/g]
$AB_5$ ( $LaNi_5$ )	A: Mm(Mischmetal – amestec pământuri rare), La (Lanton), Ce (Ceriu) B: Ni, Co, Mn, Al	Grupul de aliaje cel mai folosit pentru bateriile NiMH	300
$AB_2$ ( $TiNi_2$ )	A: V, Ti B: Zr, Ni (+Cr, Co, Fe, Mn)	Materiale de baza pentru aliaje complexe	400

### Caracteristicile de încărcare și descărcare

Caracteristicile pun în evidență o rezistență care variază liniar pentru aproape orice grad de încărcare SOC, figura 8.38, al

bateriei, ceea ce permite o modelare relativ simplă în modelele vehiculelor electrice. Încărcarea acestor baterii se poate face rapid în circa o oră.

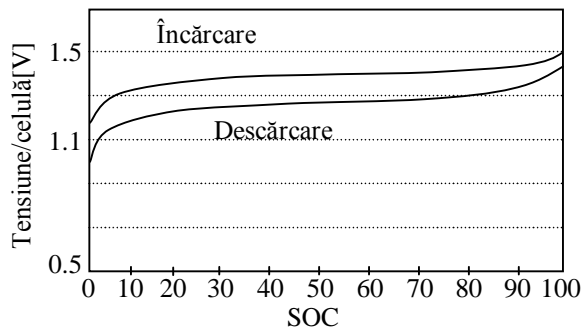


Figura 8.38 Caracteristici de încărcare și descărcare pentru baterii NiMH

Caracteristicile de încărcare depind de curent, timp și temperatură. Tensiunea bateriei crește la creșterea curentului de încărcare și la temperaturi mai mici. Eficiența încărcării este mai mare pentru intervalul de temperatură de 10 [°C] până la 30[°C]. În figura 8.39 se prezintă caracteristicile de descărcare pentru o baterie NiMH de 12V și 100Ah pentru diverse rate de descărcare.

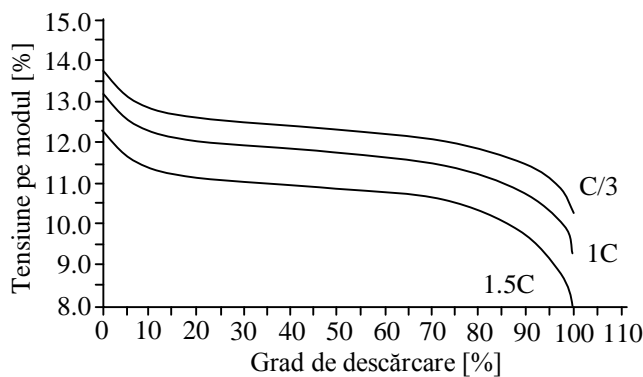


Figura 8.39 Caracteristici de descărcare pentru o baterie NiMH

## *Capacitatea bateriilor*

Capacitatea de reîncărcare este ridicată, permițând utilizarea unor curenți și tensiuni ridicate care pot aduce bateria de la o capacitate de 20% la 80% în circa 20 minute. Timpul mediu de încărcare este circa 1 oră. Prezintă efectul de memorie, ceea ce necesită (se recomandă) descărcarea completă o dată pe lună. Bateria nu trebuie să rămână conectată la sistemul de încărcare după ce operațiunea s-a încheiat.

## *Durata de viață a bateriilor*

Numărul de cicluri în care se face o descărcare de până la 80% poate să ajungă la 1000, valoarea medie fiind de 500. Potrivit unor producători, pe vehicule hibride electrice, unde variația încărcare / descărcare este mai mică, se poate ajunge la peste 150 000 de cicluri.

## *Autodescărcarea bateriilor*

La fel ca toate bateriile, cele cu NiMH, au un anumit nivel de autodescărcare care are loc în perioada de neutilizare, dar este redus când bateria este la sub 70% capacitate. Autodescărcarea depinde mult de temperatură, fiind mai mare la temperaturi mai mari, conform caracteristicilor din figura 8.40 .

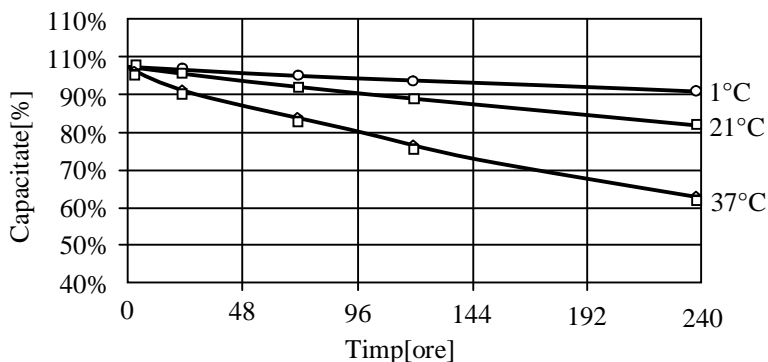


Figura 8.40 Autodescărcarea la bateriile NiMH

Se poate observa că dacă bateria este păstrată la temperatura de aproape 40°C, după 10 zile capacitatea bateriei scade la circa 60%.

Puterile specifice merg de la 200[W/kg] până la 1000 [W/kg] iar energia specifică este de 40-70 [Wh/kg]. Deoarece tensiunea pe o celulă este de 1,2V se impune utilizarea unui număr mare de celule pentru a obține o baterie de tensiune mare. Bateria poate fi recondiționată și nu este poluantă.

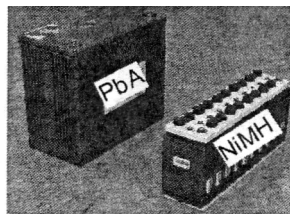


Figura 8.41 Comparație privind gabaritul  
între o baterie cu plumb și o baterie NiMH, la energii egale

De preferință, bateriile de tracțiune sunt construite, etanș, fără întreținere. Bateriile fără întreținere utilizează cantități reduse de electrolit lichid. Ele sunt însă vulnerabile datorită degradării ciclice în special în cazul încărcărilor și descărcărilor solicitante. De exemplu, o supraîncărcare poate produce oxidarea materialului activ din electrodul negativ având ca rezultat pierderi ireversibile a capacității acestui electrod și modificarea echilibrului de sarcină dintre electrodul pozitiv și cel negativ.

O altă problemă mult mai probabilă în bateriile de tracțiune comparativ cu cele de mică capacitate destinate aparaturii electronice și electro-casnice, constă dintr-o creștere a presiunii hidrogenului rezultată chiar printr-o ușoară modificare a echilibrului reacțiilor de generare și de recombinare. Când

creșterea de presiune depășește un anumit nivel, gazul suplimentar este evacuat printr-o supapă de siguranță. Eliminarea hidrogenului prin supapă va provoca o pierdere ireversibilă a capacității celulei NiMH și o creștere a rezistenței sale interne. Cea mai mare parte din acest surplus de hidrogen ia naștere datorită unei supraîncălziri parțiale la suprafața electrodului negativ (catodului). Aceste încălziri locale rezultă în urma reacțiilor exotermice a combinării oxigenului produs la anod cu hidrogenul aflat la catod. În zonele încălzite, potențialul reacțiilor de generare a hidrogenului se va reduce.

Pentru a reduce potențialul de oxidare al materialului activ din electrodul negativ și a reduce generarea suplimentară de gaz, bateria cu hidruri metalice se realizează cu capacitatea anodului mai redusă decât cea a catodului ( limitarea capacității anodice). Capacitatea în exces a catodului previne încărcarea completă a electrodului negativ și permite recombinarea totală la suprafața catodului a oxigenului produs la anod.

### **8.3.8.4. Baterii cu litiu**

Litiul este cel mai ușor metal (plutește pe apă) și are cel mai mare potențial electrochimic, fiind astfel un metal foarte reactiv.

Bateriile cu litiu (figura 8.42) constau dintr-un electrod pozitiv realizat cu oxizi metalici de litiu (de exemplu oxid de cobalt de litiu), un electrod negativ, realizat din carbon înalt cristalizat, electrolit- compus din solvenți organici, săruri de litiu și separatori [16]. Deoarece nu există un electrolit lichid, apare avantajul lipsei de scurgeri din baterie.

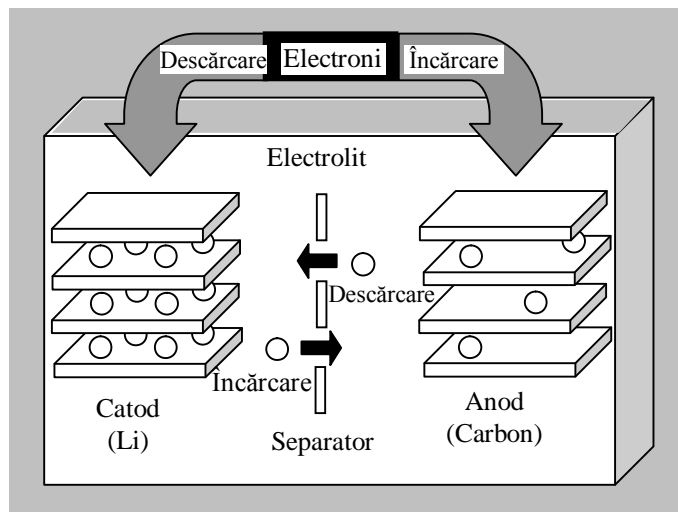


Figura 8.42 Bateria cu litiu, principiu de funcționare

Încărcarea și descărcarea se face prin intermediul ionilor de litiu, proces care nu implică reacții chimice dăunătoare. Litiul are cel mai coborât potențial electric dintre toate elementele.

Acest lucru permite bateriei cu litiu să aibă cea mai mare tensiune de lucru dintre baterii și o mai mare densitate de energie și putere față de bateriile cu Pb și bateriile NiMH.

În tabelul 8.7 se prezintă caracteristici ale bateriilor cu litiu realizate de firma Hitachi Group. Pentru a obține o tensiune mare se folosesc 48 de celule cu tensiunea de 3,6[V/cel], ceea ce permite obținerea tensiunii de 173V pe pachet. Pachetul furnizează 1305 [W/kg] la o masă de circa 20kg.

Un număr de 6 sisteme electronice monitorizează 8 seturi de câte 6 celule având în vedere tensiunea, temperatura etc. și trimit semnale la sistemul de control al bateriei.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Tabelul 8.7 Caracteristici ale bateriilor cu litiu

	HEV	EV
Dimensiuni[mm]	260x541x160	290x440x186
Masa [kg]	20,2	29,3
Tensiune [V]	173	30
Capacitate [Ah]	3,6	90
Densitate de energie [Wh/kg]	-	93
Densitate de putere [W/kg]	1350	350

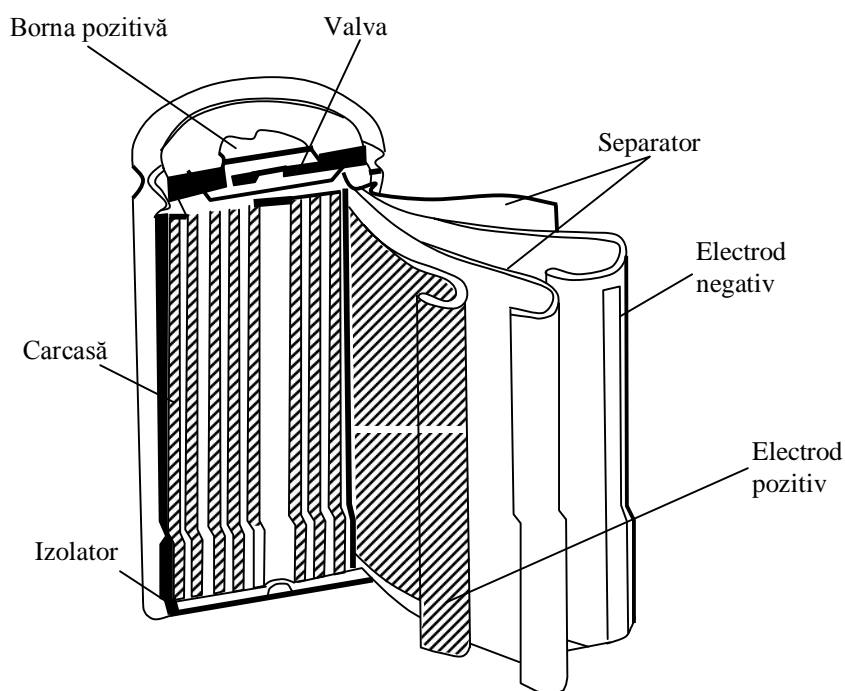


Figura 8.43 Bateria cu litiu, structura

Bateriile Litiu-ion au cea mai mare tensiune pe celulă (3,6V), și o capacitate ridicată pentru un volum dat. Densitatea de energie este mare, de circa 4 ori mai mare decât la bateriile cu plumb. Sunt intens folosite la telefoane mobile și la laptop-uri,

având energie specifică mare, putere specifică mare și o bună eficiență energetică, se comportă bine și la temperaturi mai mari și gradul de autodescărcare este redus. Au dezavantajul unui cost ridicat. Descărcarea se poate face la rate de descărcare de până la 40C. Pot fi construite la capacități diferite, de la 0,5Ah până la 1000Ah. Rata de autodescărcare este redusă și nu există efectul de memorie.

Reacțiile dintr-o baterie cu litiu (pentru cazul unei baterii la care litiul este inserat în cristale de cobalt,  $\text{LiCoO}_2$ ) pot fi scrise astfel:

La electrodul negativ



La electrodul pozitiv



Conform (figura 8.43), din punct de vedere constructiv, bateria are trei staturi constituite din cei doi electrozi și un separator și realizate sub formă spiralată. Bateria poate avea și o valvă anti-explozivă care eliberează gazul din baterie dacă presiunea internă depășește o anumită valoare. Litiul din electrodul pozitiv este ionizat în timpul încărcării și se deplasează la electrodul negativ. La descărcare, ionii se deplasează spre electrodul pozitiv și revin la structura originală. Bateriile Litiu-ion nu prezintă efectul de memorie care apare la alte tipuri de baterii, iar la descărcare tensiunea are o valoare aproximativ constantă.

Dacă bateria este păstrată la temperaturi mai scăzute de circa  $15^\circ\text{C}$ , capacitatea de descărcare este redusă. Necesită condiții mai stricte de transport față de alte baterii.



### 8.3.8.5. Pile de combustie

#### Principiul de funcționare al pilei de combustie

În principiu, pila de combustie reprezintă un dispozitiv care transformă direct energia unui combustibil în energie electrică fără a fi nevoie de arderea acestuia. Structura de bază a unei pile de combustie cu hidrogen, prezentată în figura 8.44, este formată din doi electrozi cu structură poroasă și un electrolit.

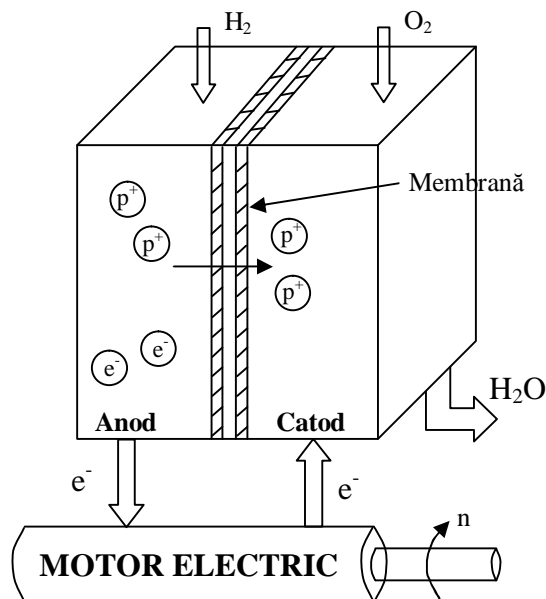


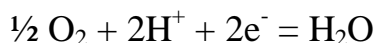
Figura 8.44 Pila de combustie cu hidrogen

Funcționarea pilei de combustie, se poate vedea în figura 8.44, și constă în reacția dintre hidrogen și oxigen, în urma căreia rezultă energie electrică și apă. O membrană specială separă cele două gaze și împiedică astfel reacția directă. Când hidrogenul se află în zona anodică, un catalizator de platină facilitează separarea hidrogenului în electroni și protoni (ioni de hidrogen).

Funcționarea celulei se bazează pe deplasarea ionilor de hidrogen prin membrană, de la anod la catod, în timp ce electronii nu sunt lăsați să treacă. Descompunerea hidrogenului se face după reacția



În zona catodică electronii se combină cu oxigenul rezultând apă



Electronii, care nu pot trece prin membrane, vor trece de la anod la catod prin circuitul exterior, prin sarcină, producând energie electrică. De notat că energia electrică furnizată de pilă este în curent continuu și este produsă atâta timp cât pila este alimentată cu hidrogen și oxigen. Membrana electrolitică are un rol foarte important; astfel, ea este zona în care au loc reacțiile de ionizare și deionizare, permite trecerea ionilor de la anod la catod și separă fizic substanțele din pilă. Catalizatorul cel mai folosit este platina și este depus la nivel de nanometri ( $3 \div 5$  [nm]) pe un suport de grafit – particule de grafit de  $0,7 - 1$  [ $\mu\text{m}$ ]. Două folii sunt aplicate pe ambele părți ale membranei formând straturile de catalizator pentru anod și catod.

### **Tipuri de pile de combustie**

Se deosebesc următoarele tipuri de pile de combustie :

1. Pile cu polimeri (Polymer Electrolyte Fuel Cell – PEMFC), cu temperaturi de lucru de circa  $80^\circ\text{C}$ . Aceste pile, cunoscute și sub denumirea Proton Exchange Membrane (PEM), sunt pilele cele mai dezvoltate pentru vehicule datorită avantajelor lor: sunt relativ simple; pot lucra cu combustibil impur, în comparație cu alte tipuri care necesită hidrogen pur.

2. Pile cu electrolit alcalin (Alkaline Fuel Cell – AFC), cu temperaturi de lucru de circa 100°C. La aceste pile electrolitul folosit este o soluție apoasă de potasiu KOH, iar combustibilul este hidrogenul pur.

3. Pile cu acid fosforic (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC), ce lucrează la temperaturi de circa 200°C. Ele sunt prea voluminoase pentru vehicule electrice, dar sunt recomandate pentru aplicații statice, având randament de circa 40%.

4. Pile cu metanol (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC), cu temperaturi de lucru de 80-120°C. Pilele cu metanol sunt similare celor cu polimeri, dar au drept combustibil metanolul din care se obține hidrogen direct pe vehicul.

5. Pile cu carbonați topiți ( Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC). Datorită temperaturii mari de lucru, de circa 700[°C], aceste pile nu sunt recomandate pentru vehicule, dar în aplicații statice se pot dovedi eficiente atât prin randamentul ridicat, de aproximativ 50%, cât și prin posibilitatea de cogenerare a căldurii, ceea ce crește randamentul global.

6. Pile cu electrolit solid compact sau tubular (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC), cu temperaturi de lucru ridicate, de 800-1000[°C].

Din cele prezentate se estimează folosirea pentru vehiculele electrice a pilelor: alcaline, cu polimeri sau cu metanol. Tensiunea electrică obținută pe o celulă este de 0,6-1,2V, în funcție de tipul pilei.

Randamentul total, în funcție de sistemul utilizat, este între 20 și 31% fiind mai mare decât cel corespunzător vehiculelor convenționale (care au un randament total de circa 18%).

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Schema de principiu a unui vehicul electric, avînd în echipare sa pila cu hidrogen, se poate vedea în fig. 8.45.

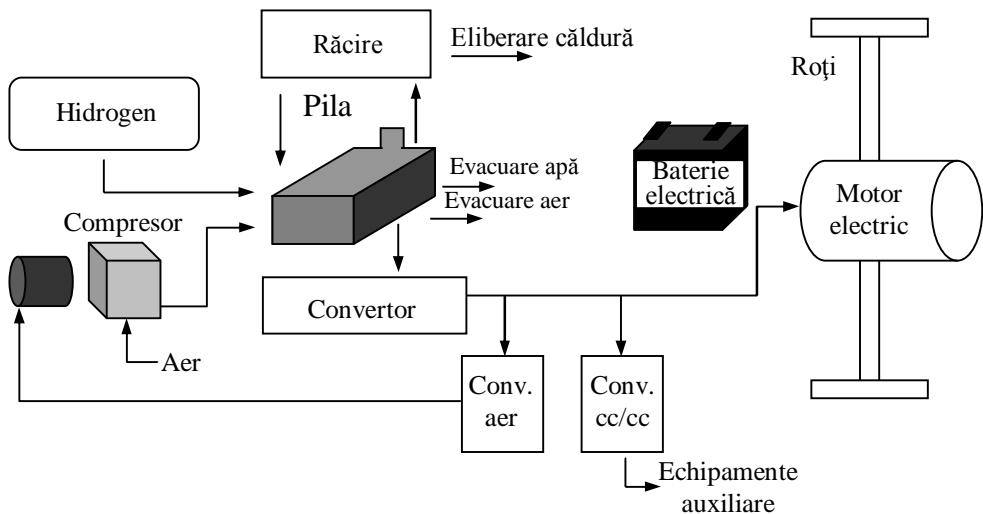


Fig. 8.45 Vehicul echipat cu pila de hidrogen  
Schema de principiu

Rezervorul de hidrogen, alimentează pila electrică, de la care se alimentează motorul de tracțiune, bateria și echipamentele auxiliare. Pentru alimentarea echipamentelor auxiliare sunt necesare convertoare de cc/cc sau cc/ca. Un alt sistem important este cel de alimentare cu aer, care trebuie să furnizeze un volum de aer, avînd umiditatea de peste 80%, temperatura max 60grd C, purificat printr-un filtru. Consumul de energie al sistemului de alimentare cu aer poate atinge 22% din consumul total pe vehicul. La fel de important este separatorul aer-apă, deoarece aerul evacuat din pilă are o concentrație mare de vapori care trebuie

colectați. Hidrogenul este stocat sub formă de gaz într-un rezervor din fibră de carbon, rezistent la presiune.

Aducerea tensiunii generată de pilă la nivelul necesar pentru motor și baterie, se face cu ajutorul convertorului principal, care poate controla puterea de ieșire în funcție de sarcina cerută.

Pentru un vehicul echipat cu pilă de combustie, la care hidrogenul este obținut din metanol, schema de principiu este prezentată în figura 8.46

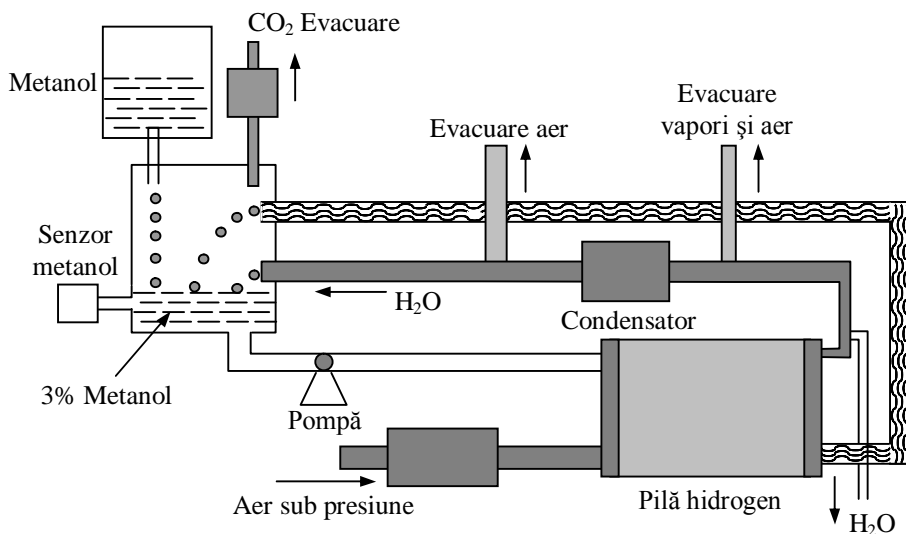


Figura 8.46. Vehicul cu pilă de hidrogen, obținut din metanol  
Schema de principiu

Ca elemente principale sistemul dispune de rezervorul de metanol, vasul de amestec metanol-apă, pila de combustie, precum și echipamentele de admisie și evacuare apă și aer, la care se adaugă senzori de temperatură, debit, presiune.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Având în vedere prețul acestor sisteme cu pilă de combustie, care se ridică la 1500-3000 \$/kW, este evident că acesta este de 8-10 ori mai mare decât al unui VEH, cu toate acestea în perspectiva progreselor tehnologice sistemul de propulsie cu pilă de combustie reprezintă soluția ideală pe termen lung în domeniu.

În continuare , în tabelul 8.8 se prezintă principalele caracteristici ale unui autovehicul cu pile ce combustie, marca Honda.

Tabel 8.8 Date tehnice , vehicul cu pile de combustie

Vehicul		Honda FCX cu Honda FC Stack
Locuri		4
Viteza maximă		140 [km/h]
Motor	Putere max.	80 [kW], (107 [CP])
	Cuplu max.	272 [Nm]
	Tip	Motor electric asincron
Pilă de combustie	Tip	PEMFC (Proton Exchange Membrane fuel cell)
	Putere	86 [kW]
Combustibil	Tip	Hidrogen sub formă de gaz comprimat
	Stocare	Rezervor sub presiune (5000 psi)
	Capacitate	3,75 [kg], 156,6 litri
Dimensiuni (L×l×H)		4165×1760×1645 [mm]
Stocare energie		Supercondensatoare
Autonomie		270 [km]

După aproape 30 de ani de cercetări, firma Honda a reușit să producă un vehicul cu pile de combustie, destinat comercializării, ultima variantă datînd din 2005, anume Honda FCX.

### 8.3.8.6. Baterii de supercondensatoare

#### Condensatoare dublu strat

Ca și caracteristici mai puțin performante ale bateriilor de tracțiune, alături de scăderea randamentului de funcționare la temperaturi reduse și a creșterii rezistenței interne, de durata de funcționare relativ limitată în special în cazul solicitărilor intense, (cazul vehiculelor electrice hibride) și de prețul ridicat, cea mai deranjantă constă în timpul lent de răspuns la solicitări de vârf (acclerații, frânari, porniri la rece, regimuri start-stop).

Bateria de supercondensatoare, BS, constituie o alternativă tehnologică nouă de stocare și eliberare a energiei electrice ce caută să suplinească din caracteristicile neperformante ale bateriilor, fără ca aceasta să afecteze negativ ceilalți parametri specifici surselor de energie electrică proprii vehiculelor electrice hibride. La baza structurii unei baterii de supercondensatoare se află condensatorul în structură dublu strat și cu toate că principiul de funcționare a fost descoperit încă din 1879 de către Helmholtz, obținerea unor componente performante a fost posibilă doar în ultimii ani.

Principala caracteristică a unui condensator dublu strat, CDS, constă în capacitatea mult superioară de stocare a energiei electrice comparativ cu cea a unui condensator obișnuit cu dielectric.

O baterie de supercondensatoare oferă capacitate de câteva mii de Farazi (realizări recente 3200[F]) eliberează cantități importante de energie în timpi de ordinul secundelor și poate face față unui număr de câteva sute de mii de cicli pe toată durata lor

de funcționare și la un randament ridicat. Având curenți de funcționare superiori, de sute de amperi, o putere specifică instantanee variind între 0,1 și 100 [kW/kg], supercondensatoarele constituie un potențial important de energie și putere ridicată complementar bateriilor. Deși bateriile de supercondensatoare pot prelua complet în anumite cazuri funcțiile bateriei de tracțiune, utilizarea lor de bază este de a asista bateria, dispunându-se astfel de o energie specifică ridicată dar și de posibilitatea de a o elibera într-un timp foarte scurt. Făcând o comparație, așa cum motorul electric asistă motorul cu ardere internă, îmbunătățind randamentul întregului ansamblu, bateria de supercondensatoare va prelua vârfurile de solicitare excesivă a bateriei de tracțiune mărind performanțele și durata de funcționare a ansamblului de stocare. Dacă luăm în considerare puterea specifică, bateria de supercondensatoare oferă performanțe identice sau superioare celor specifice bateriilor de tracțiune. Din nefericire, energia specifică ce poate fi stocată într-o baterie de supercondensatoare este mai redusă decât cea din bateriile chimice.

Putem face o comparație între echipamentele de stocare a energiei electrice cu ajutorul unui grafic specific, numit diagrama Ragone, care raportează energia specifică a dispozitivului (celule de combustie, baterii, condensatoare, dispozitive de stocare a energiei electrice în magneți superconductori, SMES-Superconducting Magnetizing Energy Storage-, sau așa numitul starter-alternator integrat în volantă, SAI) respectiv la puterea specifică corespunzătoare. O asemenea diagramă este prezentată în figura 8.47.

Bateriile au o capacitate foarte bună de stocare a energiei având la baza acestui proces reacții electrochimice. Puterea lor



specifică este însă scăzută, atât datorită timpilor mari ai reacțiilor respective cât și rezistenței interne care variază foarte mult cu starea de încărcare (SOC), respectiv cu temperatură externă.

În contrast cu bateriile, condensatorul cu dielectric oferă o densitate energetică foarte scăzută. Eliberarea energiei se face extrem de rapid astfel încât puterea specifică obținută are valori ridicate. Noua tehnologie a condensatoarelor dublu strat umple golul semnificativ dintre baterii și condensatoarele clasice având energii specifice de până la 100 ori mai mari comparativ cu acestea din urmă. Asocierea dintre o baterie de tracțiune și o baterie supercondensatoare oferă astfel caracteristicile sursei ideale de energie electrică pentru tracțiune.

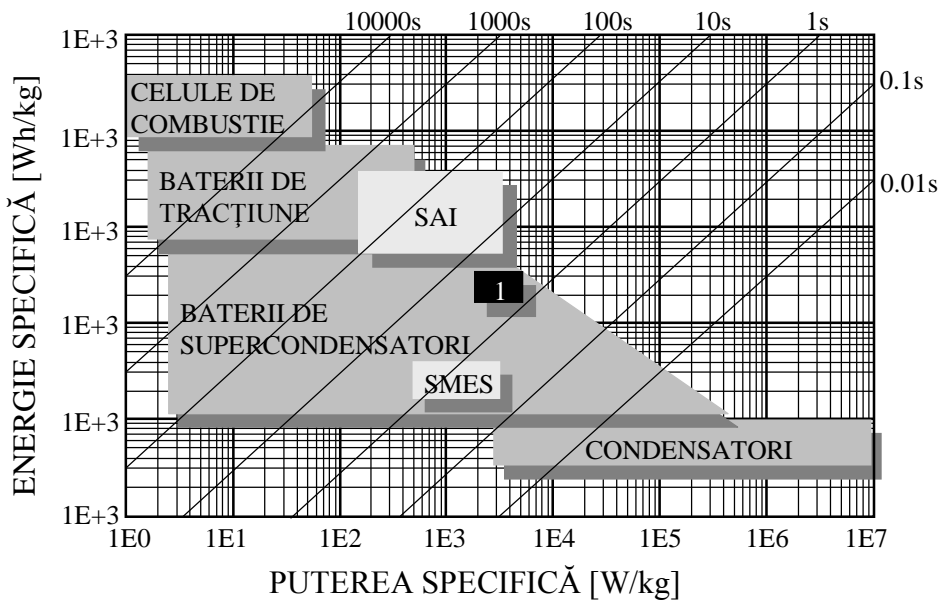


Figura 8.47 Diagrama Ragone: dependența dintre energiile specifice puterile specifice ale surselor de stocare a energiei electrice de pe vehiculele electrice hibride; SAI Starter-Alternator Integrat în volantă; SMES-dispozitive de stocare energetice cu magneți supraconductori; 1-categorie specială de supercondensatoare denumită baterie tampon supercapacitivă (BOOSTCAP)

### **Structura condensatoarelor dublu-strat**

Aceste condensatoare sunt formate din doi electrozi pe bază de cărbune activ plasați într-un electrolit organic sau apos și izolați electric printr-o membrană separatoare. Aceste trei componente trebuie selectate astfel încât să ofere următoarele caracteristici specifice: conductibilitate ionică ridicată a electrolitului, izolație electrică bună, conductibilitate ionică mare a separatorului, suprafață foarte mare a electrozilor, grosimea electrozilor și a separatorului foarte mică.

Electrozii sunt depuși sub formă de pastă pe câte o membrană ce oferă posibilitatea plierii și rulării lor pentru obținerea unor suprafețe mari în volume reduse și asigură totodată izolația electrică între electrozi fără a împiedica deplasarea ionilor între aceștia. Structura desfășurată a unui condensator dublu strat se poate observa în figura 8.48.

Pentru a exploata posibilitățile dublului strat electric în termeni de energie specifică și capacitate volumică, s-a recurs la materiale cu electrozi poroși cu suprafață specifică foarte mare, cum ar fi carbonul activ ( $1000 \text{ [m}^2/\text{g}]$ ). Utilizarea unui asemenea material permite creșterea suprafeței de contact dintre electrod și electrolit fără a mări volumul total al ansamblului.

Dacă se aplică o diferență de potențial, ionii circulă între cei doi electrozi prin intermediul electrolitului și prin materialul poros al membranei (separator) intercalat între aceștia. În stare de încărcare electrică, anionii (+) și cationii (-) se localizează în apropierea electrozilor de polaritate opusă astfel încât să creeze un echilibru cu sarcinile electrice din cărbunele activ.

În acest fel iau naștere cele două regiuni (straturi) de polaritate opusă încărcate electric. Pe suprafețe externe ale electrozilor sunt depuse folii metalice foarte bune conducătoare de electricitate, iar întreg ansamblul rezultat este rulat sau pliat în forme cilindrice sau rectangulare și așezat în carcase metalice corespunzătoare. Astfel de structuri sunt prezentate în figura 8.49.

După pliere și asamblare în carcasă, compoziția internă este impregnată cu electrolit. Acesta poate să fie solid, organic, sau lichid în funcție de aplicația și puterea solicitată.

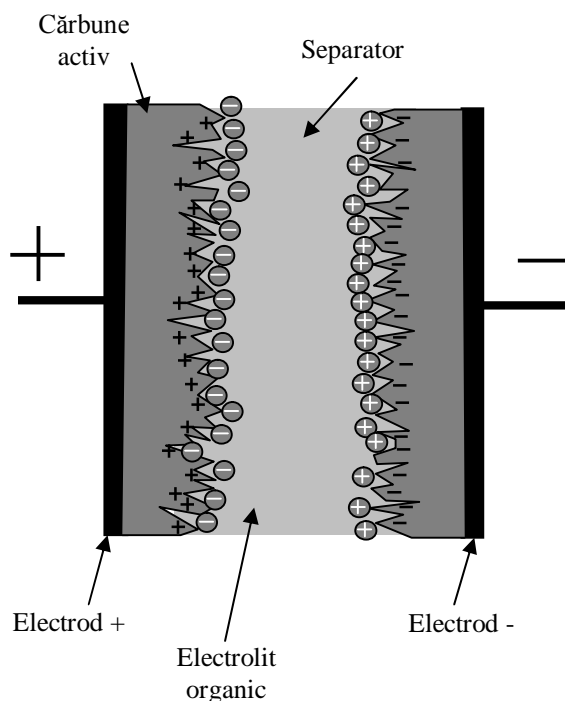


Figura 8.48 Condensator dublu strat

Tensiunea de lucru a condensatoarelor dublu strat este stabilită de tensiunile interne de descompunere ale electrolitului și depinde în principal de temperatura externă, de intensitatea curentului și de durata de funcționare.

Din cauza distanței foarte reduse care separă cele două regiuni cu acumulări de sarcini electrice opuse aflate la interfața cu electrolitul dar și a suprafeței întinse a electrozilor, capacitatea acestor condensatoare este foarte mare, de ordinul sutelor de farazi.

Materialele cele mai utilizate pentru realizarea electrozilor sunt cele care oferă o suprafață activă cât mai mare precum oxizii de metale, cărbunele sau grafitul. Acestea trebuie să fie materiale inerte din punct de vedere electrochimic, ieftine, compatibile cu electrolitul din punct de vedere chimic și electric.

Pentru aplicațiile care impun energii specifice ridicate, cel mai utilizat este cărbunele activ de tip pulbere sau fibră. Acesta se depune sub formă de pastă direct pe folia metalică a electrozilor. Din cauza numărului imens de granule, rezistența internă a electrodului rezultată prin însumarea rezistențelor de contact dintre granule sau dintre granulă și suprafața electrodului atinge valori destul de ridicate.

Pentru a reduce această rezistență, pulberea activă se amestecă cu fibre sau pulberi metalice și se presează intens pentru amestecarea lor cât mai bună și pentru eliminarea aerului. Suprafețele substanței active rezultate ajung astfel la valori impresionante, cele mai perfecționate soluții oferind 3000 [m<sup>2</sup>] pe gram de material.

Capacitatea crește liniar cu suprafața electrozilor ajungând astfel la valori de 250 [F/g] sau 100 [F/cm<sup>3</sup>]. Grosimea stratului activ este de ordinul a 100 [μm] la o grosime a foliei metalice a electrodului de 25 [μm].

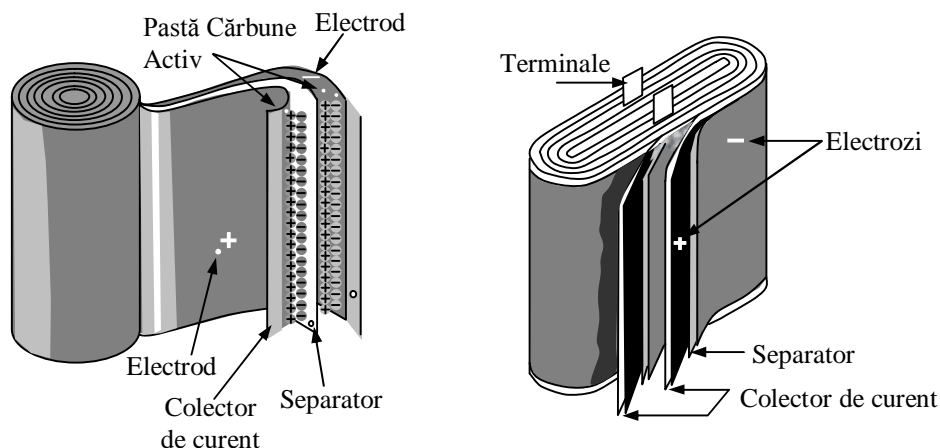


Figura 8.49 Modul de pliere și rulare al electrozilor dublu strat  
în structuri cilindrice sau paralelipedice

Făcînd o comparație, electroliții apoși bazici, KOH, sau acizi,  $H_2SO_4$ , oferă tensiuni de disociere de doar 1,25 V, iar electroliții organici obținuți prin dizolvarea sărurilor cuadrivalente în solvenți organici prezintă tensiuni de disociere duble, de 2,5 V. Densitatea de energie va fi astfel de patru ori mai mare în cazul electroliților organici și din acest motiv acești electroliți sunt utilizați cu preponderență în bateriile de supercondensatoare destinate vehiculelor electrice hibride. Ca un aspect negativ se poate aminti conductivitatea electrică mai redusă a acestor electroliți fapt ce conduce la mărirea rezistenței interne a condensatorului,  $r_{int}$ . Din acest motiv se utilizează un compus organic, acetonitril care mărește conductibilitatea până la 60 [mS/cm].

Valoarea redusă a tensiunii , reprezintă o constrângere severă pentru integrarea supercondensatoarelor în sisteme ca

vehiculele hibride. Astfel, pentru a obține un nivel ridicat de tensiune, asocierea mai multor celule, numită pachet de supercondensatoare este esențială (supercondensatoarele sunt conectate în serie și/sau în paralel). Aceasta mărește volumul ocupat și costul și în plus, la acestea se adaugă problemele echilibrării celulelor din pachet. Membrana separatoare are ca scop izolarea electrică între electrozi trebuind totodată să asigure o bună circulație a ionilor prin electrolit. Separatorii se aleg în raport cu electrolitul utilizat. În cazul electrolitelor organici, cei mai utilizați sunt separatorii pe bază de polimeri sau hârtie, în timp ce pentru electroliti apoși cele mai indicate sunt membranele din fibră de sticlă sau ceramice.

### **8.3.9. Motoare electrice, pentru propulsia VEH**

Este cunoscut că mașinile electrice pot funcționa în două regimuri principale:

- a) regim de motor, în care convertesc energia electrică preluată de la o sursă (rețea electrică industrială, generator electric, baterie chimică, etc,) în energie mecanică la axul mașinii;
- b) regim de generator, în care convertesc energia mecanică preluată de la un motor de antrenare (motor termic, motor electric, mașină de lucru cu cuplu rezistent potențial, roțile vehiculului în mișcare aflat în perioadele de frânare, etc) în energie electrică.

Motoarele electrice constituie singurul sistem de propulsie de pe vehiculele electrice. Pe vehiculele electrice hibride există

două sisteme de propulsie: cu motoare termice (cu ardere internă) și cu motoare electrice, care pot fi utilizate în diferite configurații: serie, paralel, mixtă. Motoarele electrice de pe vehiculele electrice sau vehiculele hibride transformă energia electrică din unitatea de stocare în energie mecanică care acționează roțile vehiculului.

Comparativ cu motoarele termice, motoarele electrice prezintă o serie de avantaje importante: produc cupluri de valori mari la viteze mici, valorile puterii instantanee pot depăși de 2-3 ori puterea nominală a motorului, valorile cuplului motor sunt ușor reproductibile, limitele de reglare ale vitezei sunt mai mari. Cu aceste caracteristici se asigură performanțe dinamice bune: accelerații mari și respectiv timpi mici atât la pornire cât și la frânare. În cazul alegerii motoarelor electrice de tracțiune pentru vehiculele electrice sau hibride, se cere o atenție specială și trebuie ținut cont în principal de trei factori: cerințele conductorului, restricțiile vehiculului și sursa de energie. Cerințele conductorului sunt definite printr-un profil de deplasare care include accelerația, viteza maximă, capacitatea de urcare a rampelor, siguranța frânării și distanța maximă parcursă. Restricțiile vehiculului depind de tipul vehiculului, greutatea acestuia și sarcina transportată. Sursa de energie poate fi formată din: baterii, pile de combustie, supercondensatoare și combinații ale acestora.

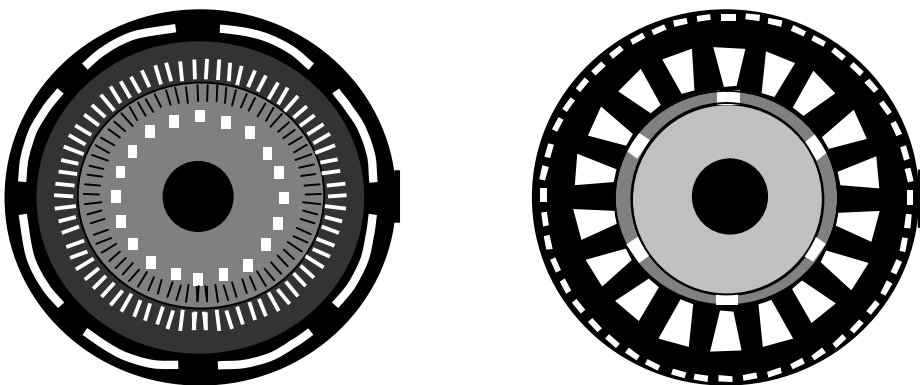
Principalele tipuri de motoare electrice adoptate pentru propulsia vehiculelor electrice sau a vehiculelor hibride sunt : motoare de curent continuu (de obicei cu excitație serie), motoare asincrone, motoare sincrone cu magneți permanenți și motoare cu reluctanță variabilă.

Încă din anii 80, motoarele de curent continuu cu excitație serie au fost utilizate pe anumite prototipuri de automobile electrice. Datorită dimensiunilor mari și dificultăților de întreținere determinate de existența colectorului, în prezent, motoarele de curent continuu tind să fie înlocuite nu numai de pe vehiculele electrice sau hibride ci și din alte aplicații industriale. Pe vehiculele electrice și/sau hibride actuale se folosesc în special motoare de curent alternativ: motoare asincrone, figura 8.48.a, motoare sincrone cu magneți permanenți, figura 8.48.b. Tehnologia motoarelor de curent alternativ a evoluat spectaculos în ultimii 50 de ani. Tehnicile de control ale motoarelor de curent alternativ sunt mult mai complexe decât ale motoarelor de curent continuu. Prin utilizarea metodelor de control vectorial bazate pe transformările sistemelor de axe de referință, a fost posibilă obținerea unor performanțe ale acționărilor cu motoare asincrone comparabile cu cele obținute la acționările cu motoare de curent continuu. Dezvoltarea procesoarelor de semnal rapide a oferit posibilitatea efectuării relativ ușoare și într-un timp scurt a volumului mare de calcule necesare pentru dezvoltarea ecuațiilor de funcționare ale motoarelor asincrone și pentru implementarea unor algoritmi de reglare complecși.

Un concurent important al motorului asincron, figura 8.50.a este motorul sincron cu magneți permanenți figura 8.50.b. Statorul acestui motor are o construcție asemănătoare cu cel al motorului asincron. Pe rotorul motorului sincron sunt plasați magneții permanenți, care pot forma poli aparenti sau pot fi înserați în interiorul rotorului, formând poli înecați. Fluxul din întrefierul motorului sincron cu magneți permanenți poate fi de formă sinusoidală sau trapezoidală. Prin utilizarea magneților de mare



densitate din pământuri rare în motoarele sincrone se realizează o densitate de putere mare, dar costul ridicat al magneților constituie un impediment în special pentru motoarele de putere mare. Pentru vehiculele hibride în configurație paralel, unde sunt necesare motoare electrice de putere medie, performanțele obținute cu motoarele sincrone sunt foarte bune și compensează costul mare al acestor motoare.



a)Motor asincron

b)Motor sincron cu magneți permanenți

Figura 8.50 Motoare electrice de curent alternativ de pe vehicule hibride.

Alimentarea motoarelor sincrone se face cu ajutorul convertoarelor de frecvență, cu structuri de forță asemănătoare celor utilizate pentru motoare asincrone, dar controlate cu algoritmi mai simpli.

Un alt motor electric de tracțiune poate fi motorul cu reluctanța variabilă, care are o construcție foarte simplă. Pe rotorul acestui motor nu există înfășurări, magneți sau colivie care să contribuie la creșterea inerției și cuplului motorului. Caracteristica cuplu-viteza a acestui motor este foarte convenabilă în raport cu caracteristica cuplului rezistent al vehiculului astfel încât

aplicațiile acestui motor pe vehiculele electrice sau hibride se consideră ca fiind remarcabile. Dezavantajele motorului cu reluctanță variabilă sunt determinate de zgomotul în funcționare și de oscilațiile cuplului electromagnetic.

### **8.3.9.1. Cerințele ce trebuie îndeplinite de către motoarele electrice de pe vehiculele hibride**

În ideea unei comparații între cerințele pe care trebuie să le satisfacă motoarele electrice și cele termice de pe vehiculele hibride, se poate considera un vehicul hibrid cu o configurație de tip paralel. Într-o asemenea structură motorul termic și motorul electric sunt cuplate la arborele de acționare al roților prin două ambreiaje, astfel încât puterea de propulsie poate fi furnizată separat, fie numai de motorul termic, fie numai de motorul electric, fie de ambele motoare cuplate în paralel. Pentru a obține reducerea emisiilor de noxe și a consumului de combustibil motorul termic trebuie asistat de motorul electric, în perioadele de demaraj și de frânare și în perioadele de suprasarcină la viteze mari.

Motorul electric funcționează la putere constantă, fără să se supraîncălzească, așa cum arată caracteristica cuplu-viteza reprezentată prin curba 1, din figura 8.49. Motorul termic furnizează o putere mare la pornire, necesară pentru accelerarea vehiculului. În funcție de tipul motorului electric, în anumite condiții se poate asigura cuplul maxim, respectiv vârful cuplului, la viteza zero. În aplicațiile de pe vehiculele electrice sau hibride vârful cuplului trebuie menținut aproximativ un interval de timp de 60-90 de secunde. Vârful puterii pentru un motor corespunde

vitezei unghiulare de bază  $\omega_b$ , figura 8.49 și figura 8.50, când caracteristicile motorului intră din regiunea de cuplu constant în regiunea de putere constantă și când este atinsă limita tensiunii de alimentare. Viteza unghiulară maximă  $\omega_{max}$  a motorului, figura 8.51 și figura 8.52, corespunde sfârșitului regiunii de putere constantă .

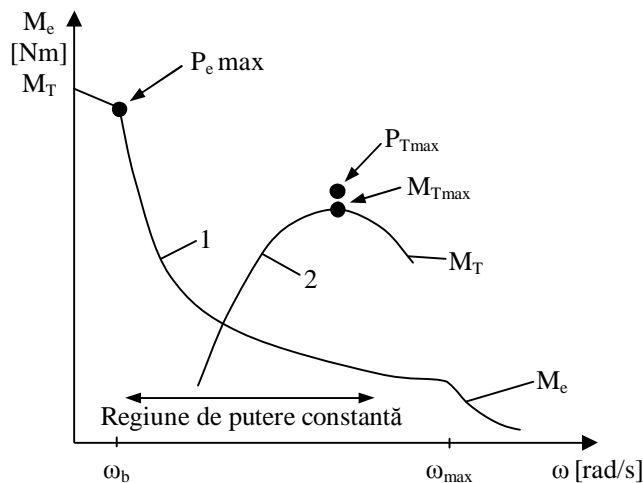


Figura 8.51 Caracteristicile cuplu viteză pentru motoarele electrice și pentru motoarele termice

Caracteristica cuplu-viteză a motorului termic este reprezentată prin curba 2, din figura 8.51 [29]. Pentru motorul termic vârfurile de putere și de cuplu se produc aproximativ la aceeași viteză. Din analiza curbei 2, figura 8.51 se observă că motorul termic nu produce cuplu sub o anumită viteză, iar puterea maximă este furnizată într-un interval redus de viteze. Pentru a putea menține funcționarea motorului termic în această zonă de viteze pe durata deplasării vehiculului, care are loc cu viteze foarte diferite, se impune utilizarea unei transmisii mecanice între

motorul termic și roțile vehiculului. În structura de vehicul hibrid paralel, la deplasările pe distanțe lungi, cu viteze ridicate, motorul termic va fi utilizat la putere maximă, iar motorul electric la aproximativ jumătate din puterea sa. Puterea motorului electric de pe un vehicul hibrid de tip paralel influențează decisiv performanțele dinamice și consumul de combustibil. Raportul dintre puterea maximă a motorului electric,  $P_{ME}$ , și puterea motorului termic (cu ardere internă)  $P_{MT}$  este caracterizat de factorul de hibridizare FH care este definit de relația :

$$FH = \frac{P_{ME}}{P_{ME} + P_{MT}} = \frac{P_{ME}}{P_{VEH}} \quad (8.12)$$

unde  $P_{VEH}$  este puterea de tracțiune totală maximă pentru propulsia vehiculului. Se poate demonstra că se reduce consumul de combustibil și cresc performanțele dinamice pentru un factor de hibridizare mai mare de un punct optim critic ( $FH = 0.3 \div 0.5$ ). Peste acest punct optim creșterea puterii motorului electric nu îmbunătățește performanțele vehiculului hibrid [37].

Cerințele pe care trebuie să le satisfacă motoarele electrice de tracțiune de pe vehiculele hibride sunt următoarele :

- putere instantanee mare și densitate de putere mare
- cuplu mare la viteze mici pentru pornire și urcare pe rampe, precum și putere mare la viteze mari pentru deplasări pe distanțe lungi
- zone largi de viteze incluzând regiuni de cuplu constant și putere constantă
- răspuns în cuplu rapid
- eficiență ridicată pentru frânarea recuperativă
- siguranță ridicată și robustețe pentru diferite condiții de funcționare,

- cost redus

În figura 8.52 sunt reprezentate caracteristicile standard cuplu-viteză  $M_e(\omega)$  și putere viteză  $P(\omega)$  ale motoarelor electrice utilizate pe vehicule electrice, sau vehicule electrice hibride.

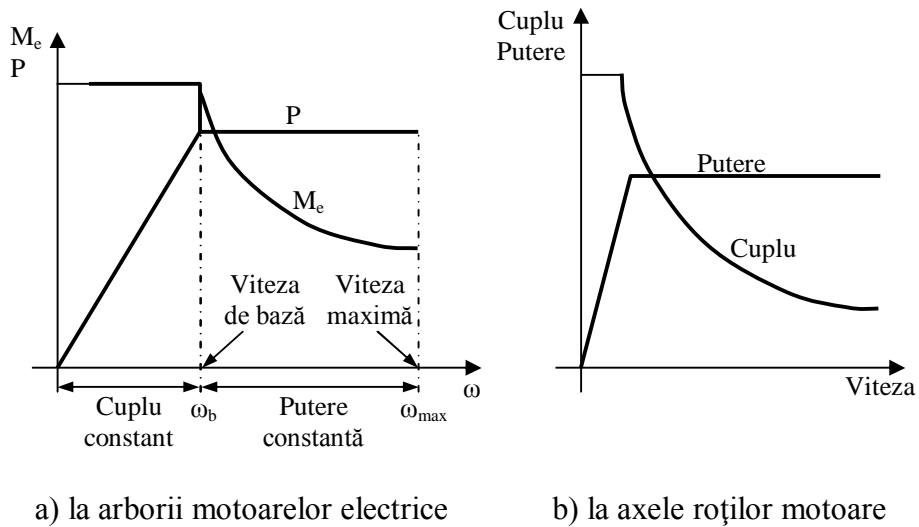


Figura 8.52 Caracteristici standard cuplu-viteză și putere-viteză

Caracteristicile corespund caracteristicilor cuplu-viteză și putere-viteză la roțile motoare ale vehiculelor hibride, reprezentate în figura 8.52.b.

Pentru o sursă de putere cu o valoare dată a puterii, puterea rămâne constantă într-o gamă largă de viteze, iar cuplul de tracțiune scade hiperbolic cu creșterea vitezei vehiculului.

### 8.3.9.2. Motoare asincrone pentru propulsia VEH

#### Principiul de funcționare al motorului asincron

Datorită siguranței în funcționare, întreținerii ușoare, costului redus și capacității de a funcționa în medii periculoase, motorul de inducție (asincron) cu rotorul în scurtcircuit este considerat ca fiind cel mai bun motor pentru propulsia vehiculelor electrice hibride. În etapa actuală dintre diferitele acționări cu motoare fără colector, tehnologia acționărilor cu motoare asincrone este cea mai utilizată. Din punct de vedere constructiv motoarele asincrone trifazate sunt formate din două circuite magnetice concentrice: circuitul magnetic exterior, este partea imobilă a mașinii sau statorul și circuitul magnetic interior, este partea mobilă a mașinii sau rotorul. Cele două circuite magnetice sunt separate printr-un spațiu liber numit întrefier. Statorul motorului asincron rotativ are forma unei coroane cilindrice, prevăzută cu creștături pe fața interioară, în care este dispusă o înfășurare trifazată. Într-o secțiune transversală prin stator, înfășurarea statorică are o distribuție spațială sinusoidală pe circumferința statorului. Deși înfășurările celor trei faze sunt reprezentate ca înfășurări concentrate, distribuite după axele lor  $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$ , figura 8.53.a, decalate între ele spațial cu  $120^\circ$ , numărul de spire din fiecare fază variază sinusoidal de-a lungul circumferinței statorului, (de exemplu, pentru faza a) figura 8.53.b. Numărul de spire în creștătură este menținut același pentru simplificarea execuției înfășurării, dar distribuția sinusoidală a înfășurării fiecărei faze se obține prin diferite căi.

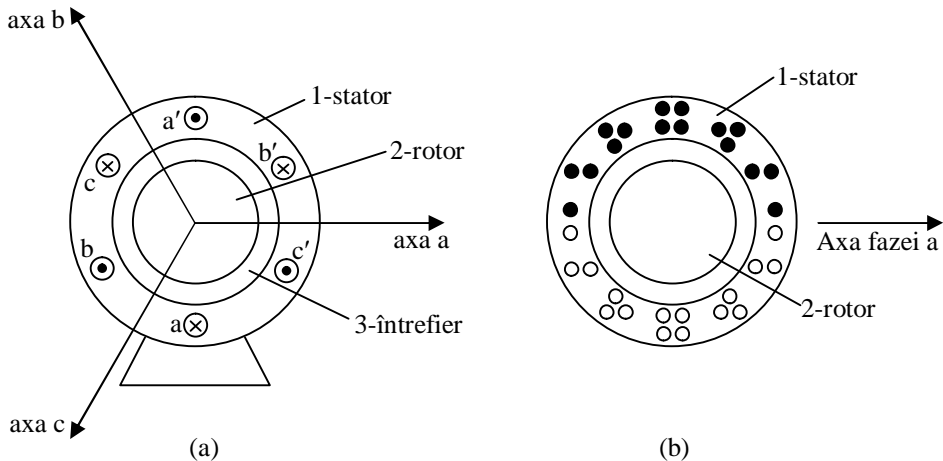


Figura 8.53 a) Dispunerea axelor magnetice ale înfășurărilor trifazate ale motorului asincron; b) Distribuția sinusoidală a înfășurării fazei aa' pe circumferința statorului

Alimentarea înfășurărilor statorice se face de la o sursă de tensiune alternativă trifazată și acestea pot fi conectate în stea sau în triunghi. Rotorul cilindric al motorului asincron, de obicei, este prevăzut cu creștături pe suprafața exterioară în care poate fi plasată fie o înfășurare trifazată (bobinată) similară înfășurării statorice, fie o înfășurare polifazată realizată din bare conductoare scurtcircuitate la ambele capete, de forma unei colivii de veveriță. Mașina asincronă poate funcționa pe vehiculele electrice hibride fie în regim de motor, când va transforma energia electrică în energie mecanică, fie în regim de generator, când va transforma energia mecanică în energie electrică.

Atunci când funcționează în regim de motor, la alimentarea mașinii de la o sursă de energie electrică (generator electric de curent alternativ, baterii și invertor) cu un sistem de tensiuni trifazat simetric, înfășurarea statorică este parcursă de un sistem trifazat simetric de curenți de pulsație  $\omega_1$  care vor produce un

câmp magnetic învârtitor cu viteza unghiulară de sincronism  $\Omega_1$  dată de relația:

$$\Omega_1 = \omega_1/p_1 = 2\pi f_1/p_1 = 2\pi n_1/60; \quad n_1 = 60f_1/p_1$$

în care:

- $n_1$  [rot/min], este turația sincronă a câmpului învârtitor;
- $f_1$  [Hz], este frecvența tensiunii de alimentare
- $p_1$  este numărul de perechi de poli ai statorului (inductorului).

Se notează cu  $\Omega = \omega_r$  viteza mecanică a rotorului și cu  $\omega = p_1 \Omega$  viteza electrică a acestuia. Se consideră inițial că rotorul este imobil față de stator, deci viteza sa unghiulară este  $\Omega = 0$ , respectiv turația este  $n=0$ . În rotorul aflat în repaus câmpul învârtitor induce în înfășurarea trifazată rotorică un sistem trifazat simetric de tensiuni de valoare  $U_{e2}$  și pulsație  $\omega_2$ , (unde  $\omega_2 = p_1 (\Omega_1 - \Omega) = p_1 \Omega_1 = \omega_1$ , pentru  $\Omega=0$  și frecvența  $f_2 = p_1 n_1 = f_1$ ). Înfășurările rotorice fiind scurtcircuitate vor fi parcurse de un sistem simetric de curenți. Curenții rotorici produc un câmp magnetic învârtitor de reacție, care față de rotor are viteza unghiulară  $\Omega_2 = \omega_2 / p_1$ , iar față de stator are viteza unghiulară  $\Omega + \Omega_2 = \Omega_1$ .

Câmpul magnetic inductor statoric și câmpul magnetic de reacție al rotorului au aceeași viteză unghiulară față de stator. Cele două câmpuri se compun și dau un câmp magnetic învârtitor rezultat.

Din interacțiunea câmpului învârtitor rezultat și curenții din înfășurările rotorice se produce un cuplu electromagnetic  $M_{e2} = M_e$  ce acționează asupra rotorului în sensul câmpului învârtitor și imprimă acestuia o mișcare de rotație de viteză unghiulară  $\Omega$ .



Asupra statorului, acționează cuplul electromagnetic  $M_{el} = - M_e$  în sens opus câmpului magnetic învârtitor, figura 8.52.

Figura 8.54 prezintă o explicație a diferitelor viteze de rotație și cupluri existente la motorul asincron, unde:

- $M_{el}$  este cuplul care acționează asupra statorului
- $M_{e2}$  este cuplul care acționează asupra rotorului;

Aceste două cupluri sunt egale în modul, dar au sensuri diferite.

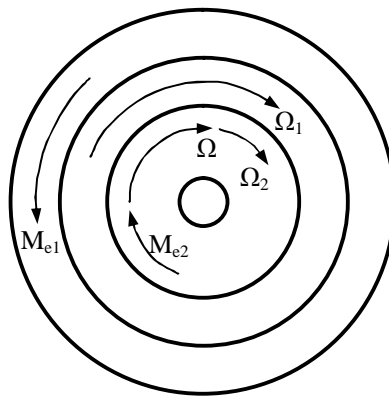


Figura 8.54 Cupluri și viteze de rotație în motorul asincron

În timpul funcționării viteza unghiulară a rotorului  $\Omega$  este diferită de viteza unghiulară  $\Omega_1$  a câmpului învârtitor. Mărimea care caracterizează diferența dintre viteza unghiulară  $\Omega_1$  (turația  $n_1$ ) a câmpului învârtitor și viteza unghiulară  $\Omega$  (turația  $n$ ) a rotorului se numește alunecare și se determină cu relațiile:

$$s = (\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1 = (n_1 - n) / n_1 \quad (8.13)$$

Dacă rotorul se învârti cu viteza unghiulară  $\Omega < \Omega_1$  în sensul câmpului învârtitor, în înfășurarea rotorică se va induce tensiunea electromotoare de frecvență  $f_2$  și de valoare  $U_{ers}$

$$f_2 = \frac{p_1(\Omega_1 - \Omega)}{2\pi} = sf_1; U_{ers} = \frac{f_2}{f_1} U_{er} = sU_{er} \quad (8.14)$$

în care:

- $U_{er}$  este tensiunea indusă în secundar când rotorul este în repaus
- $U_{ers}$  este tensiunea efectivă când există alunecarea  $s$ .

Se produce un cuplu electromagnetic ce tinde să aducă rotorul la turația de sincronism ( $P_e > 0$ ). Se spune că mașina electrică funcționează în regim de motor care se stabilizează la o viteză subsincronă  $\Omega < \Omega_1$ , (respectiv turație  $n < n_1$ ), iar cuplul dezvoltat de mașină echilibrează cuplul rezistent la axul motorului. În mașină se produce conversia puterii electrice primare la bornele primare în putere mecanică la axul mașinii. În acest caz mașina preia de la sursă o putere reactivă  $Q$  necesară magnetizării circuitului magnetic.

Când rotorul este antrenat din exterior la o viteză suprasincronă,  $\Omega > \Omega_1$  (respectiv turație  $n > n_1$ ),  $s < 0$ , mașina electrică poate debita energie electrică în rețea. În mașină are loc conversia puterii mecanice de la ax, în putere electrică. Pe vehiculele electrice hibride regimul de generator al mașinii asincrone interesează în mod deosebit, deoarece mașina este folosită pentru recuperarea energiei la frânare. Dacă rotorul mașinii asincrone este antrenat în sens invers câmpului învârtitor al statorului, alunecarea  $s$  devine supraunitară și mașina funcționează în regim de frână electrică sau reostatică. În acest caz motorul primește putere mecanică la arbore,  $P_{mec} < 0$  iar  $P_e > 0$ .

Figura 8.55 prezintă regimurile de funcționare ale mașinii asincrone. Puterea electromagnetică  $P_e$  transmisă rotorului prin intermediul câmpului electromagnetic prin întrefier are două componente :

$$P_e = P_{jr} + P_{mec} ; P_{jr} = m_l R_r I_r^2$$

unde:  $P_{jr}$  reprezintă pierderile prin efect Joule în circuitul rotoric și  $P_{mec}$  este puterea mecanică,  $m_1$  este numărul de faze statorice,  $R_r$ ,  $I_r$  sunt rezistența rotorică pe fază, respectiv curentul pe fază rotoric.

Puterea mecanică  $P_{mec} = P_e - P_{jr}$  acoperă pierderile prin frecări în lagăre și ventilație proprie  $P_{lv}$ , precum și pierderile în fierul rotorului  $P_{Fe}$ . Puterea utilă la arborele motorului  $P_u$  este diferența dintre puterea mecanică și pierderile din rotor, adică :

$$P_u = P_{mec} - P_{lv} - P_{Fe}$$

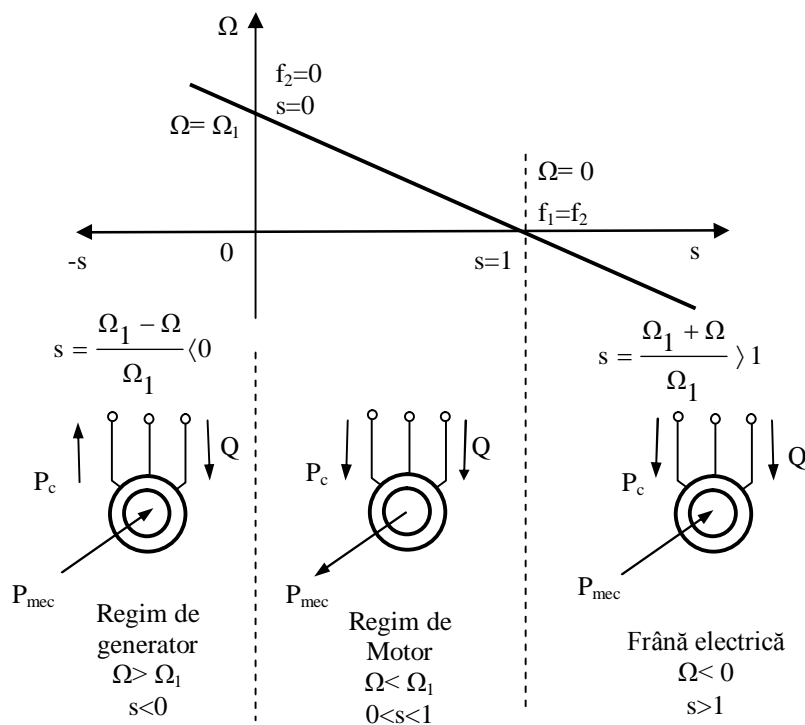


Figura 8.55 Mașina asincronă, regimuri de funcționare

### 8.3.9.3. Motoare sincrone cu magneți permanenți, pentru propulsia VEH

*Principiul de funcționare al motoarelor sincrone cu magneți permanenți*

Considerăm structura de principiu din figura 8.56, formată dintr-o armătură fixă și una mobilă. Pe armătura fixă este dispusă o înfășurare alimentată cu un curent  $i_1$ , iar armătura mobilă este realizată dintr-un magnet permanent N-S. Cuplul electromagnetic produs de sistem este :

$$M_a = \left( \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \right)_{i_j = \text{const}} = -\Psi_{0m} \cdot i_1 \cdot \sin \theta \quad (8.15)$$

unde:

$W_m$  – este energia magnetică totală a sistemului

$\Psi_{0m}$  – este fluxul total util produs de magnetul permanent

$\theta$  – este unghiul de poziție rotoric;

$i_1$  – este curentul prin înfășurarea de pe armătura fixă.

Cuplul activ este cel produs de interacțiunea dintre câmpul magnetului permanent și curentul de înfășurare și acționează în sensul reducerii coordonatei generalizate  $\theta$ .

La motorul cu magneți permanenți, poziția  $\theta=0$  este stabilă, în sensul că orice perturbație ce tinde să scoată rotorul din această poziție, duce la apariția unui cuplu, activ sau reactiv, ce tinde să readucă rotorul în poziția de echilibru. În cazul în care câmpul magnetic produs de înfășurarea de pe armătura statorică este rotitor, rezultă că rotorul mașinii trebuie să urmărească axa câmpului statoric, rotirea sa având loc cu o viteză egală cu viteza de rotație a câmpului învârtitor.

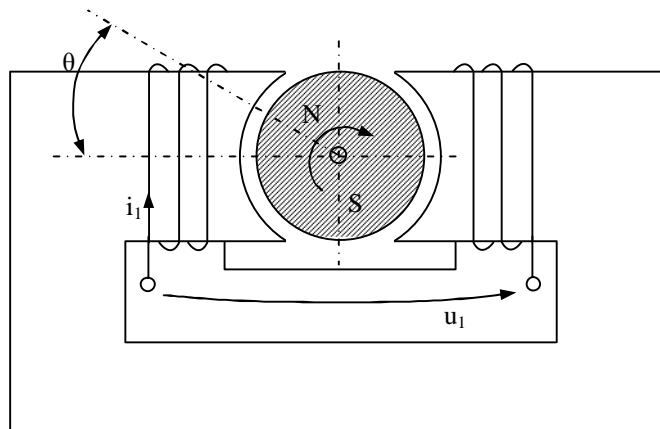


Figura 8.56 Motor cu magneți permanenți

Un asemenea cuplu are o valoare medie diferită de zero doar dacă viteza de rotație a rotorului este egală cu viteza câmpului învârtitor, ceea ce echivalează cu faptul că pentru a funcționa motorul trebuie adus la sincronism cu mijloace externe. Cel mai adesea, aducerea la o viteză apropiată de cea sincronă se face pornind mașina în asincron.

Constructiv motoarele sincrone cu magneți permanenți se caracterizează prin următoarele caracteristici :

- statorul acestor mașini, asemănător cu cel al oricăror altor motoare de curent alternativ, este realizat din tole de oțel electrotehnic, în creștăturile sale fiind plasată înfășurarea monofazăată sau polifazăată de excitație;
- rotorul motoarelor sincrone cu magneți permanenți se realizează în două variante constructive și anume: în construcție normală, cu poli aparenti și colivie de veveriță, respectiv cu poli

ghiară, soluție utilizată în general la puteri mici și pentru un număr mare de poli.

Luând în considerare modul de poziționare al coliviei față de magnetii permanenți, rotorul în construcție normală poate fi de două tipuri: cu construcție radială, figura 8.57.a, sau cu construcție axială, figura 8.57.b,c.

Figura 8.58.a prezintă soluția constructivă care prevede așezarea magnetului permanent direct pe ax, pe fețele sale exterioare lipindu-se piese polare în care sunt plasate barele coliviei de pornire.

De notat că această configurație poate fi utilizată doar în cazul magnetilor permanenți metalici, deoarece magnetul preia întregul cuplu transmis la ax.

În cazul magnetilor ceramici (ferite) este de preferat soluția din figura 8.58.b, magnetii permanenți fiind plasați sub forma unor pastile între polii aparenti ai rotorului.

Folosirea magnetilor permanenți se bazează pe proprietatea lor de a prezenta un câmp magnetic remanent care poate fi menținut constant pe perioade îndelungate, caracteristicile principale fiind valoarea inducției remanente  $B_r$  și intensitatea câmpului magnetic coercitiv  $H_c$ , dar performanțele globale ale unui magnet vor fi date de produsul  $(BH)_{\max}$  corespunzător energiei magnetice maxime pe unitatea de volum de material magnetic.

Magnetizarea magnetilor se poate realiza în circuitul magnetic în care urmează să funcționeze sau în afara circuitului, magnetul fiind apoi montat în mașina.

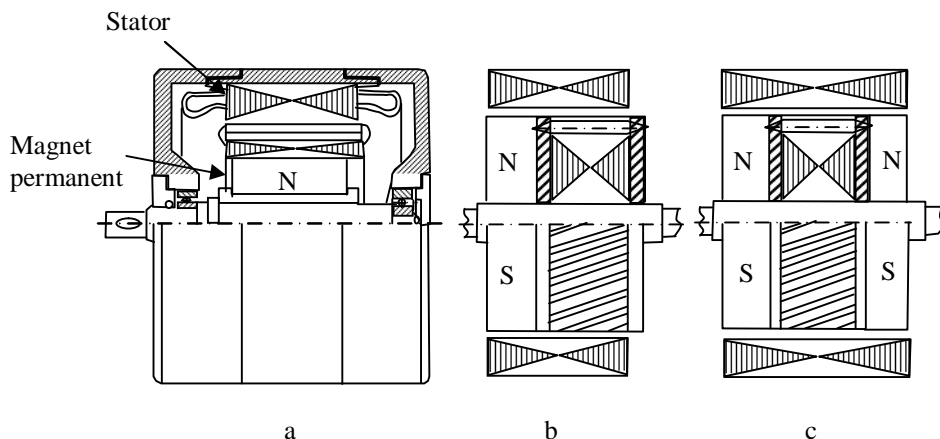


Figura 8.57 Motor cu magneți permanenți , construcție (a) radială, (b) axială cu un rând de magneți, (c) axială, cu două rânduri de magneți

Un alt criteriu după care se deosebesc tipurile de rotor îl constituie modul de așezare al magnetului permanent în interiorul rotorului.

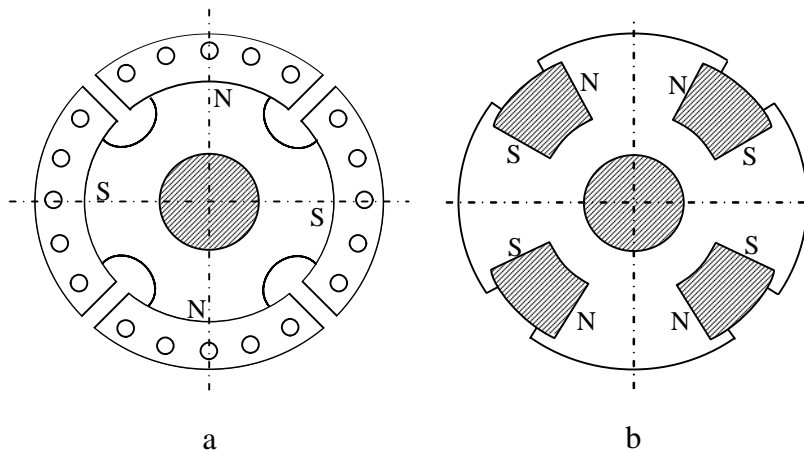


Figura 8.58 Motor cu magneți permanenți:  
a. cu configurație de poli aparenti b. cu magneți sub formă de pastile

Magneții permanenți cei mai cunoscuți sunt de tip Alnico, aliaj ce conține cobalt între 10% și 40%, material ce le asigură o inducție remanentă ridicată. Magneții sunt obținuți prin turnare,

după ce au fost omogenizați la temperaturi ridicate și răciți în câmp magnetic puternic. Pentru creșterea câmpului lor coercitiv, ei sunt supuși la tratamente de revenire. Magneții permanenți Alnico au diverse denumiri: Ticonal, Hycomax, Magnico, Koerzit 400, Oerstit 400, clasificarea lor diferind de la țară la țară.

Cu cât performanțele acestor magneți sunt mai bune, cu atât prețul lor este mai ridicat. Din punct de vedere economic, feritele prezintă prețul de cost cel mai redus, preț care este de câteva ori mai scăzut decât al materialelor de tip Alnico.

Materialele de bază ale feritelor, oxid de fier  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  și oxid de stronțiu  $\text{SrO}$ , se găsesc din abundență, iar fabricarea lor prin presare și sinterizare în câmp magnetic este relativ simplă. Din păcate, inducția remanentă redusă a acestor materiale cere utilizarea unor soluții constructive mai complicate, concentratoare de flux, iar energia maximă este modestă față de celelalte materiale magnetice, ceea ce duce la dimensiuni mari ale mașinilor.

A treia clasă de magneți permanenți sunt aliajele mangan-aluminiu-carbon,  $\text{Mn-Al-C}$ , care, prin prețul de cost scăzut al materialelor de bază, reprezintă o soluție interesantă. Ei prezintă o inducție remanentă superioară feritelor și energii magnetice acceptabile.

A patra clasă de magneți permanenți o reprezintă magneții pe bază de pământuri rare (Samariu-cobalt,  $\text{SmCo}_5$  și neodim-fier-bor,  $\text{NdFeB}$ ), care prezintă energii magnetice ridicate, dar au ca dezavantaj prețul mare, deoarece sunt compuși din materiale deficitare și se obțin prin tehnologii speciale.



#### **8.3.9.4. Motore cu reluctanță variabilă, pentru propulsia VEH**

*Principiul de funcționare al motoarelor cu reluctanță variabilă*

Datorită construcției simple, controlului simplu și capacității lor de funcționare la viteze mari, motoarele cu reluctanță variabilă (MRV), au început să capete un mare interes pentru propulsia vehiculelor electrice hibride. Motoarele cu reluctanță variabilă au poli aparenti atât pe stator cât și pe rotor, cu înfășurări plasate numai pe stator. Numărul de poli este diferit pe stator și rotor, cele mai folosite fiind motoarele cu structuri de tipul 8/6 sau 6/4, adică cu 8 poli pe stator și 6 poli pe rotor, respectiv 6 poli pe stator și 4 poli pe rotor. În figura 8.59 se prezintă, în secțiune transversală, schema de principiu a unui motor cu reluctanță variabilă trifazat cu structura 6/4. Alimentarea motorului cu reluctanță variabilă se face de la o sursă de curent continuu prin intermediul unui convertor electronic a cărui comutatoare de putere sunt înseriate cu înfășurările fazelor.

Atunci când se alimentează o înfășurare statorică a unei faze, perechea de poli rotorici cea mai apropiată este atrasă astfel încât să se minimizeze reluctanța; prin alimentarea succesivă a fazelor statorice, se poate dezvolta un cuplu în orice sens de rotație. Când polii statorici și rotorici sunt perfect aliniați, reluctanța este minimă iar inductanța fazei nesaturate este maximă. Când polii rotorici sunt simetric dispuși față de cei statorici, se spune că poziția lor este nealiniată, iar inductanța fazei este minimă în această poziție. Sunt posibile și configurațiile 4/2

și 2/2 dar când polii statorici și rotorici ar fi perfect aliniați, nu ar fi posibil să se dezvolte cuplu de pornire. Variantele cu combinații mari ale numărului de poli, de exemplu 10/4, 12/8, prezintă avantajul unor variații mai mici de cuplu și nu au probleme legate de cuplul de pornire.

Ca avantaje ale motoarelor cu reluctanță variabilă se pot menționa :

- construcție simplă și preț de cost redus datorită absenței înfășurării rotorice sau a magneților permanenți (magneți realizați adesea din materiale scumpe și deficitare);

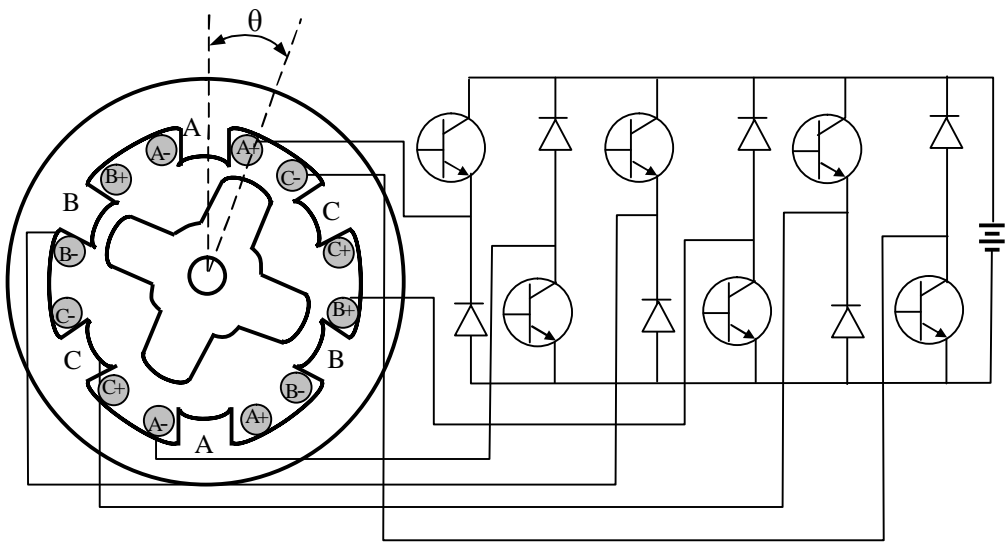


Figura 8.59 Motor cu reluctanță variabilă

- reducerea numărului de comutatoare de putere pentru că nu sunt necesari curenți bidirecționali;
- pierderile din stator sunt mai mari, dar acesta se poate răci mai ușor;
- caracteristicile cuplu-viteză ale motorului se pot adapta condițiilor de lucru încă din faza de proiectare;

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- momentul de inerție al rotorului este redus;
  - permit obținerea unei regiuni de putere constantă într-un domeniu larg de viteze;
  - fazele statorice sunt independente, astfel încât motorul poate funcționa chiar și în cazul pierderii uneia sau a mai multor faze
  - cuplul de pornire poate fi foarte mare, fără probleme legate de creșterea excesivă a curentului
  - funcționarea rotorului este permisă la temperaturi maxime, deoarece nu există înfășurări sau magneți permanenți dispuși pe acesta;
- Dezavantajele motoarelor cu reluctanța variabilă ar fi :
- pulsațiile importante ale cuplului determină oscilații mari ale curentului în sursa de alimentare, impunându-se necesitatea unui filtru capacitiv mare pentru netezirea acestora
  - poluarea fonică este mai mare decât la celelalte tipuri de motoare;
  - necesită un convertor special de alimentare; lipsa magneților permanenți impune creșterea excitației înfășurărilor statorice și deci o creștere a puterii convertorului;
  - pierderile în înfășurările statorice sunt mai mari decât la alte mașini, încât randamentul și raportul cuplu/curent sunt mai mici;
  - necesită senzori la poziție;
  - neliniaritatea caracteristicilor magnetice duce la o estimare dificilă a performanțelor.
  - controlul motoarelor poate fi mai simplu decât controlul prin metoda orientării după câmp a mașinilor de inducție, dar

pentru reducerea oscilațiilor de cuplu sunt necesare calcule importante pentru sistemul de comandă;

Ecuția de tensiuni pe o fază a motorului cu reluctanță variabilă se poate scrie în forma :

$$U_c = R_s i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (8.16)$$

unde  $U_c$  este tensiunea circuitului de curent continuu,  $i_f$  este curentul de fază instantaneu,  $R_s$  este rezistența pe fază a înfășurării,  $\Psi_f$  este fluxul magnetic pe fază. Pentru utilizarea eficientă a circuitului magnetic motorul cu reluctanță variabilă funcționează în regim de saturație și fluxul magnetic  $\Psi_f$  este o funcție neliniară de curentul statoric și de poziția rotorului  $\theta$ ,  $\Psi_f = \Psi_f(i_f, \theta)$ . Caracteristicile flux-curent ale motorului de reluctanță variabilă, pentru diferite poziții ale polilor rotorului sunt prezentate în figura 8.60. Ecuția de tensiuni (8.58) se poate rescrie astfel ,

$$U_c = R_s i_f + \frac{d\Psi_f}{di_f} \frac{di_f}{dt} + \frac{d\Psi_f}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (8.17)$$

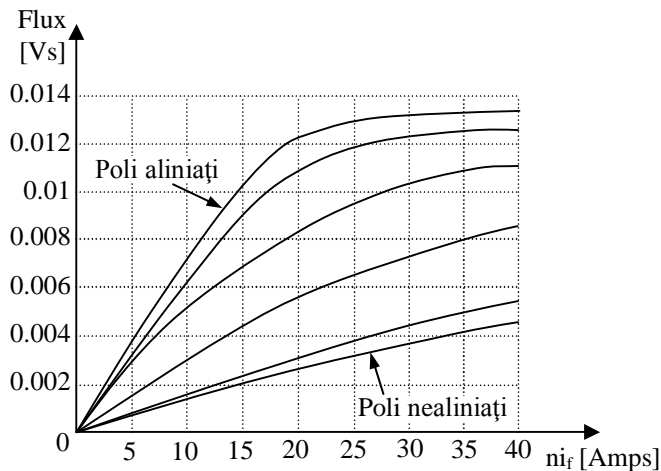


Figura 8.60 Motorul cu reluctanță variabilă, caracteristicile flux-curent

Considerând liniaritatea magnetică,  $\Psi_f = L_f(\theta)i_f$  expresia tensiunii se simplifică astfel :

$$U_c = R_s i_f + L_f(\theta) \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_f(\theta)}{d\theta} \omega \quad (8.18)$$

Ultimul termen din ecuația (8.18) este tensiunea electromotoare de mișcare indusă care, la motoarele cu reluctanță variabilă, are același efect ca și tensiunea electromotoare indusă la motoarele de curent continuu sau la mașinile cu comutație electronică. La mașinile cu reluctanță variabilă tensiunea electromotoare indusă nu este determinată însa de o rotație a fluxului magnetic și de variația valorii instantanee a fluxului magnetic. Tensiunea electromotoare dispare atunci când nu există curent în faza motorului.

Caracteristica mecanică cuplu-viteză pentru motorul cu reluctanță variabilă este prezentată în figura 8.61

#### **8.3.9.5. Particularități tehnologice și constructive ale motoarelor electrice pentru propulsia VEH**

În momentul actual motoarele de inducție (mașina asincronă – ASM) cu rotorul în colivie de veveriță sunt favorite din rațiuni de cost. Dacă se cere un raport mare putere/greutate și trebuie să fie satisfăcut un randament cât mai bun, atunci mașina sincronă excitată cu magneți permanenți (PSM) este superioară. PSM oferă un randament și un coeficient de suprasarcină foarte mari. Motorul construit pentru Fiat are o capacitate de suprasarcină de 5, fără demagnetizarea magneților permanenți.

Rezultatul este dezvoltarea unui cuplu de 320[Nm], cu un motor având un rotor cu diametrul de 80mm și o lungime activă de 200mm, figura 8.62. Combinat cu răcirea cu apă aceste mașini conduc la o utilizare extrem de eficientă. Sarcina mașinii specifice este de 80kW pentru un termen scurt (de 300 sec).

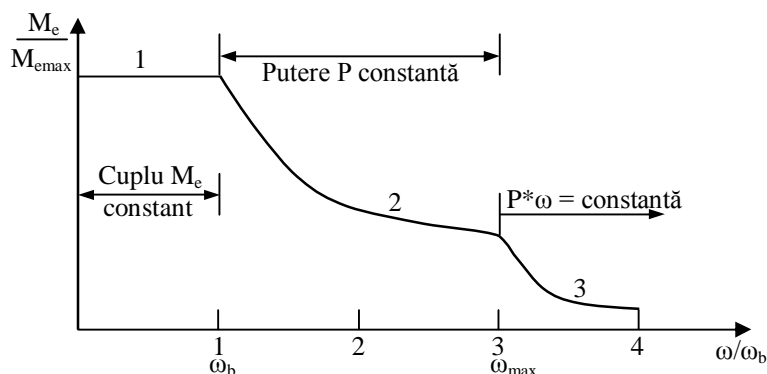


Figura 8.61 Motorul cu reluctanță variabilă  
Caracteristica mecanică cuplu-viteză

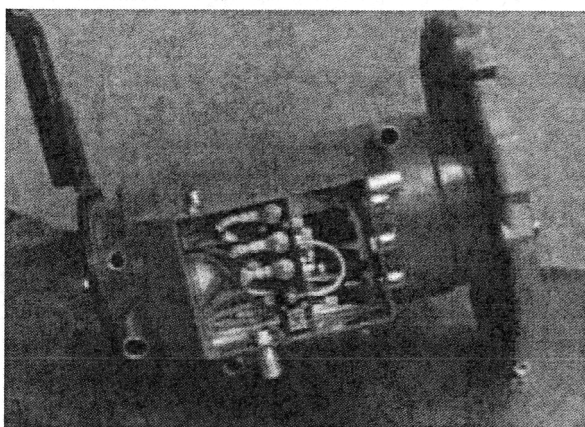


Figura 8.62 Motor PSM pentru Fiat,  
răcit cu apă, 40[Kw], 6000 rot/min

Motoarele din figurile 8.63 și 8.64 sunt realizate pentru vehicule hibride (motor electric plus motor cu ardere internă).

Utilizarea termică este corespunzătoare clasei de izolație F, dar pentru rațiuni de siguranță motoarele utilizate satisfac clasa H.

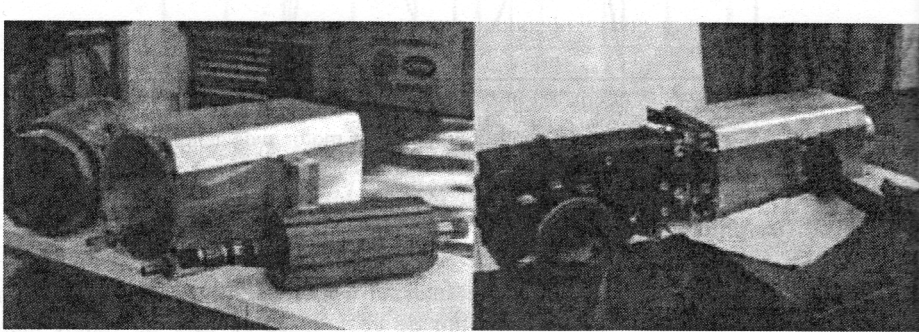


Figura 8.63 Motor PSM pentru Audi DUO 2, răcit cu apă, 30[kW], 10 000 rot/min

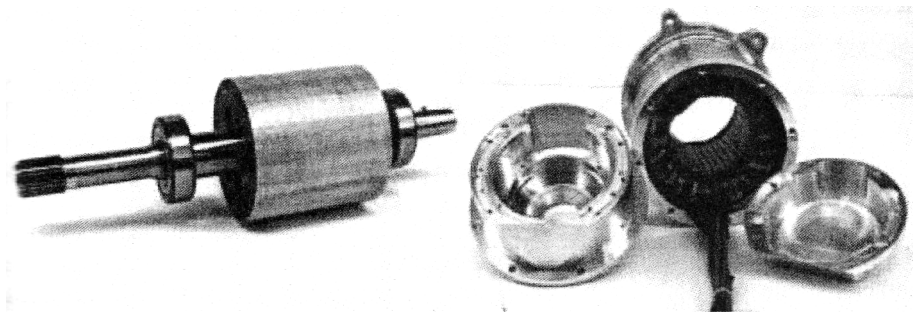


Figura 8.64 Motor PSM pentru Audi DUO 3, răcit cu apă, rotor cu diametrul de 80[mm], 30[kW], 10000 [rot/min]

## **CAPITOLUL 9**

# **PERTURBAȚII ELECTROMAGNETICE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ**



### 9.1. INTRODUCERE

Datorită complexității și varietății lor, sistemele de tracțiune electrică fac parte dintr-o categorie specială de sisteme electromecanice. Extinderea utilizării tracțiunii electrice și a celei hibride (vehicule echipate atât cu motor electric cât și cu motor cu combustie internă), tensiunile și curenții mari la care lucrează, regimurile tranzitorii dese se constituie în factori ce duc la concluzia că sistemele de tracțiune electrică pot fi considerate posibile surse de perturbații electromagnetice.

Pe de altă parte, introducerea pe scară largă a echipamentelor informatice și a celor electronice în structura vehiculelor, prezența circuitelor de semnalizare și control la sistemele de tracțiune pe cale de rulare ghidată, obligă la abordarea acestora și din perspectiva unor potențiali receptori de emisii perturbatoare.

Poluarea mediului electromagnetic a fost considerată încă din anii 1980 ca având o legătură cu înmulțirea cazurilor de leucemie [46]. Rapoarte similare au început să apară cu privire la efectul monitoarelor computerelor asupra sarcinii și legătura între emisiile radiative ale acestora și nașterea unor copii cu malformații [46].

S-au observat de asemenea modificări cromozomiale la conducătorii de vehicule sau trenuri electrice [46]. Aceasta demonstrează impactul deosebit pe care introducerea transportului electric și hibrid îl are nu numai asupra mediului înconjurător ci și asupra mediului biologic.

Abordarea problemelor legate de emisiile electromagnetice ale sistemelor de transport electric și hibrid (identificarea surselor

și a căilor de cuplaj, descrierea teoretică, dezvoltarea unor metode de reducere a emisiilor acestora, dezvoltarea unor norme și standarde care să permită conviețuirea pașnică a acestora cu alte sisteme și cu ființe umane) este deci un item important în încercarea de limitare a poluării electromagnetice a mediului.

Elementele ce compun un sistem de tracțiune electrică pot fi grupate în două categorii: instalații fixe și instalații mobile, reprezentate de vehiculul însuși. Partea de instalații fixe este determinată de tipul vehiculului electric motor, și anume :

- Pentru vehicule electrice motoare autonome, instalațiile fixe sunt reprezentate numai de calea de rulare
- Pentru vehicule electrice motoare neautonome, instalațiile fixe sunt: substațiile de tracțiune electrică, fideri de alimentare, respectiv de întoarcere ( la sistemele cu cale de rulare ghidată ), linia / șina de contact, calea de rulare, etc.

Perturbațiile electromagnetice datorate sistemului de tracțiune pot fi deci grupate în funcție de sursa lor structurală în: perturbații produse de instalațiile fixe și perturbații produse de vehiculele electrice motoare.

Deasemenea, fiecare din aceste două categorii pot fi clasificate în perturbații de natură conductivă și perturbații de natură inductivă (în câmp apropiat respectiv în câmp îndepărtat).

Gama largă de vehicule electrice motoare, respectiv de sisteme de tracțiune electrică, ne obligă la o abordare sintetică a tipurilor de perturbații, de la mecanismul producerii, la formalismul teoretic de descriere și metodele de reducere.

## 9.2. PERTURBAȚII ELECTROMAGNETICE ALE VEM

Studiul problemelor legate de emisiile electromagnetice ale vehiculelor electrice, autonome, sau neautonome, presupune, într-o primă etapă, analiza tipurilor operaționale, cu precizarea sistemelor de propulsie, sustentație și ghidare implementate pe acestea. Într-un studiu asupra emisiilor radiative ale vehiculelor electrice, respectiv ale sistemelor de tracțiune aferente operaționale la momentul actual în lume există trei categorii :

- Sistemele de mare viteză, care cuprind vehicule echipate cu mașini electrice rotative (TGV în Franța și seria 700 Shinkansen în Japonia) și vehiculele pe pernă magnetică-maglev[26],[57](Chuo Shinkansen în Japonia și Transrapid în Germania);
- Sistemele de viteză medie, utilizate în transportul urban și interurban de masă care cuprind sistemele de tracțiune electrică cu trolee, tramvaie, metrou, trenuri ușoare, locomotive electrice sau diesel-electrice, autobuze electrice.
- Sistemele de viteză redusă și capacitate redusă (din punct de vedere al numărului de călători), care cuprind automobilele electrice sau hibride.

O discuție despre blocul de acționare al unui vehicul electric motor trebuie să avem în vedere nu numai sistemul de propulsie propriu zis, ci și sistemele de sustentație și ghidare, care, la anumite vehicule, pot fi de natură electromagnetică. Pentru vehiculele electrice convenționale sustentația și ghidarea se realizează:

- Prin roți pneumatice, caz în care cu orientarea vehiculului

(ghidarea) este însărcinat mecanismul de direcție [41].

- Prin roți metalice, ghidate pe o cale de rulare cu șine metalice

Pentru vehicule electrice pe pernă magnetică sustentăția se asigură prin perna magnetică (eventual în stații se pot utiliza roți rabatabile metalice sau pneumatice), ce apare ca urmare a dezvoltării unei forțe electromagnetice (de atracție sau de repulsie) între calea de rulare și vehicul.

Sistemul de ghidare utilizează electromagneți laterali care au rolul de a asigura o ghidare controlată a vehiculelor electrice motoare față de cale, permițând raze de curbura reduse, chiar la viteze mari de circulație[46] .

Primele tipuri de sisteme de propulsie, aflate încă în uz, utilizează ca mașină de tracțiune mașina de curent continuu cu excitație serie, atât pentru rețele de tracțiune de curent continuu cât și pentru rețele de tracțiune de curent alternativ.

Mașina de curent continuu cu excitație serie a fost preferată datorită caracteristicii sale mecanice elastice și posibilității obținerii unei game largi de viteze cu mijloace relativ simple. Într-o primă etapă, circuitele de alimentare ale mașinilor de tracțiune conțineau rezistențe de pornire – frânare (pentru sistemele alimentate de la linie de contact de curent continuu), și circuite complexe de forță echipate cu numeroase siguranțe fuzibile, contactoare și rele, inclusiv inversor de sens pentru schimbarea sensului de deplasare al vehiculului (figura 9.1).

# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

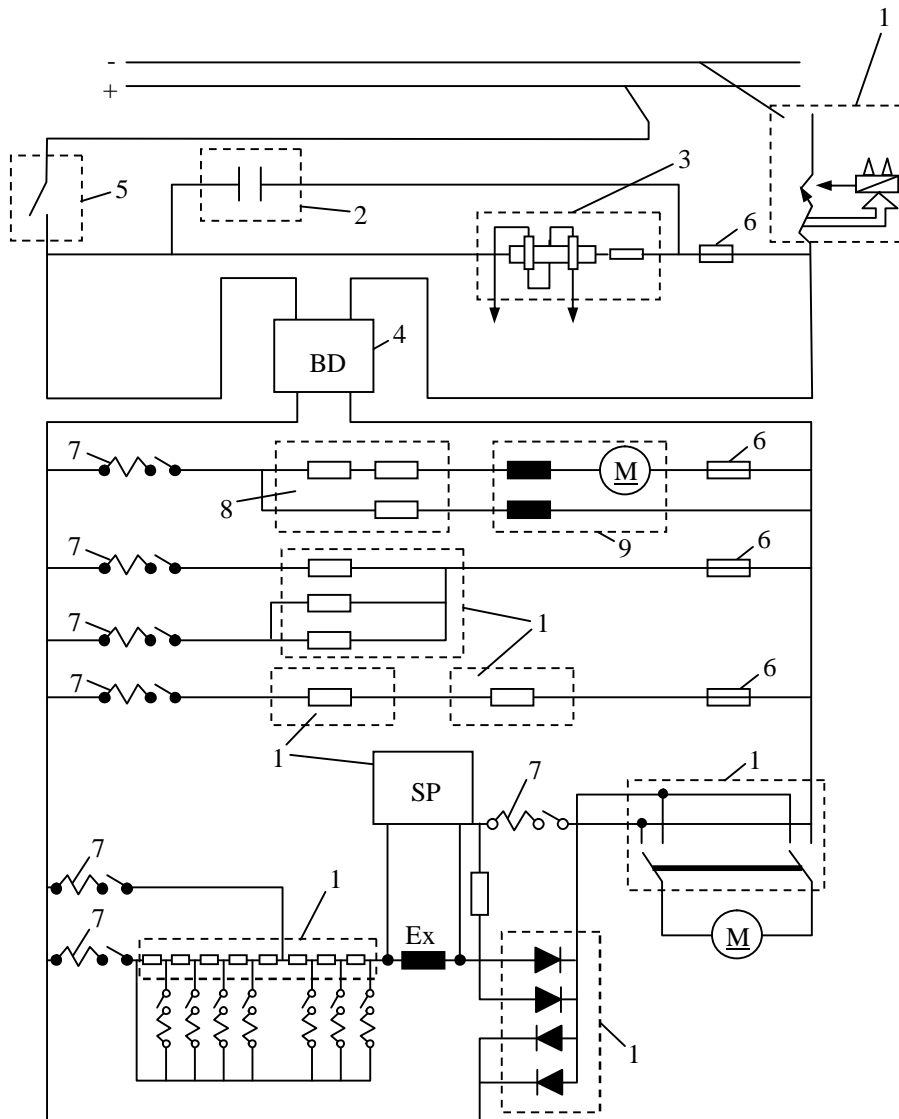


Fig. 9.1 Troleibus echipat cu motoare tracțiune de c.c cu excitație serie  
Schema de forță

- 1- întrerupător principal
- 2- condensator filtraj  $2\mu F / 1600V$
- 3- bloc de transductoare de tensiune și curent
- 4- bloc de diode 1

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

- 5- contactor de linie
- 6- siguranțe fuzibile
- 7- comutator MTU
- 8- grup rezistențe motor auxiliar
- 9- motor servicii auxiliare
- 10- aerotermă bord
- 11- aerotermă salon
- 12- reostate motor de tracțiune
- 13- sursa de preexcitație
- 14- bloc diode 2
- 15- comutator de sens
- 16- motor de tracțiune

În cazul mașinilor de tracțiune de curent continuu alimentate de la rețeaua de curent alternativ (de obicei monofazat), variantă utilizată în România în tracțiunea feroviară, circuitele de alimentare sunt prevăzute cu transformator reglabil și redresoare necomandate cu diode, la care se adaugă un echipament electric complex și cu numeroase aparate electrice. Pentru obținerea unui curent cât mai neted în mașină se utilizează selfuri de aplatizare (bobine de netezire).

Odată cu dezvoltarea electronicii de putere sistemele de propulsie în tracțiunea electrică s-au orientat spre înlocuirea rezistențelor de pornire-frânare cu variatoare de tensiune continuă și a grupurilor transformator reglabil-redresor necomandat cu redresoare comandate, cu tiristoare (figura 9.2) . Etapa următoare a constat în înlocuirea mașinilor de curent continuu și a echipamentului de forță aferent cu mașini de inducție, mult mai

reduced as a prototype and much more reliable, powered by inverters or static frequency converters.

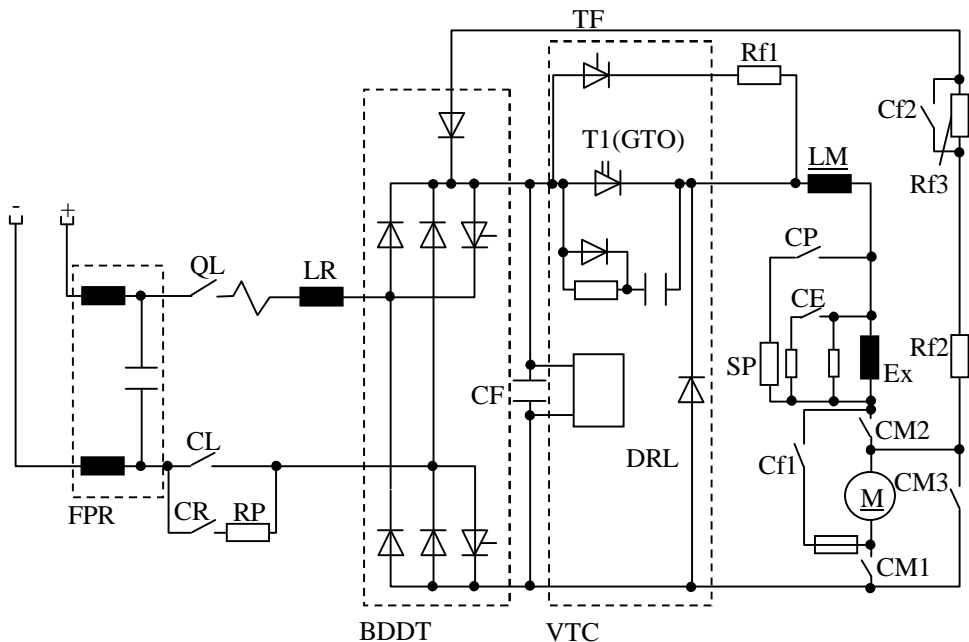


Fig. 9.2 Trolleybus echipat cu mașină de tracțiune de c.c. cu excitație serie, alimentat prin variator de tensiune continuă

Schema de forță

M – Motor de tracțiune de c.c. cu excitație serie, înfășurarea rotorică

Ex – Motor de tracțiune de c.c. cu excitație serie, înfășurarea de excitație

CP+SP+CE – Circuit de șuntare a excitației

Rfi- Rezistențe de frânare

CM1+CM2 și Cfl+ CM3 – Circuit de schimbare al sensului de mers

BDDT – Punte redresoare cu diode și tiristoare de recuperare

VTC – Variator de tensiune continuă cu GTO

FPR – Filtru paraziți radio  
QL – Întrerupător ultrarapid  
CL – Contactor de linie  
LR+ CF – Filtru de rețea  
DRL – Diodă de regim liber  
TF – Tiristor de frânare reostatică  
LM – Bobină de netezire

Actualmente sistemele de propulsie utilizează, pe lângă mașinile de inducție și mașini sincrone cu magneți permanenți și mașini cu reluctanță variabilă autocomutate electronic. Acestea presupun existența unui convertor de putere care să permită obținerea unei game largi de viteze pentru vehicul. Dezvoltarea automobilelor și a autobuzelor electrice, ca mijloace de transport urban nepoluante, au determinat studii și cercetări care au dus la varianta instalării mașinii de tracțiune în roată. O altă variantă aflată în testări la producătorii mari de automobile din lume este cea a sistemului de propulsie hibrid, care să includă atât un motor cu combustie internă, cât și unul electric.

Din această scurtă prezentare a variantelor operaționale de vehicule electrice la momentul actual în lume ne dăm seama de marea varietate structurală și funcțională a vehiculelor electrice. Sistemele de propulsie, sustentație și ghidare sunt însoțite în fiecare vehicul de sisteme informatice și electronice moderne de bord, de microsisteme electromecanice de acționare (a ferestrelor, scaunelor, ștergătoarelor de parbriz), sisteme de supraveghere și control, etc. Putem astfel concluziona că, gama mare de echipamente electrice și electronice aflate la bordul unui vehicul



electric determină o gamă largă de surse și receptori de perturbații electromagnetice.

Având în vedere tipul sistemului de propulsie, perturbațiile electromagnetice sunt cele care apar în cazul sistemelor de acționare electrică. În continuare se prezintă câteva particularități ale problemelor de compatibilitate electromagnetică ce apar în cazul vehiculelor electrice, autonome sau neautonome.

Utilizarea chopperelor (variatoare de tensiune continuă) și a invertoarelor în sistemele de tracțiune de curent continuu echipate cu circuite de cale a necesitat un studiu atent în ceea ce privește emisia de perturbații electromagnetice. Amplitudinea și frecvența armonicilor curentului din linie, determinate de sistemele de tracțiune, de curent continuu alimentate prin convertoare pot fi estimate utilizând concepte din matematica analitică pe baza unor condiții de funcționare ideale.

În sistemele de tracțiune, chopperele cu tiristoare operează la frecvențe mai mari de 400Hz, prin funcționarea la frecvență de valoare fixă evitându-se apariția armonicilor la frecvențele de semnal. Locomotivele italienești, E632/E633 de exemplu, au șase chopper care comută între diferite valori ale frecvenței cu o frecvență efectivă maximă de  $6 \times 390$ , deci 2340Hz. Pulsațiile de valoare mare ale curentului de intrare necesită conectarea echipamentului la linia de contact printr-un filtru trece-jos, cu componente de valoare mare ținând cont de faptul că trebuie să aibă o frecvență de rezonanță redusă, în mod normal între 1/5 și 1/10 din frecvența fundamentalei.

Curentul de intrare pentru un chopper echilibrat poate fi scris ca produsul dintre funcția de comutație a chopperului,  $S$ , și valoarea medie a curentului prin motor,  $I_m$ :  $I_S = S \times I_m$

Condensatorul de filtrare  $C_F$ , pe de o parte constituie un rezervor de energie electrică în perioadele în care alimentarea motorului de tracțiune e întreruptă (compensând, astfel, efectul inductanței  $L_n$  de limitare a valorii curentului absorbit de motor), iar, pe de altă parte, reduce sensibil supratensiunile ( de manevră și de comutație) la intrarea chopperului. Pentru ca în timpul funcționării convertorului undulațiile tensiunii la bornele condensatorului  $C_F$  să fie limitate la valori rezonabile și să fie insensibile la variațiile inductanței echivalente  $L_t$  a circuitului de tracțiune cu distanța dintre vehiculul cu chopper și stații de tracțiune electrică de curent continuu de alimentare ( $L_t \cong 1 \div 2 \text{Mh/km}$ ), se adoptă :

$$f_0 = \frac{l}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \leq \frac{f}{3}. \quad (9.1)$$

Frecvența de lucru a chopperului fiind practic  $f=200..400\text{Hz}$  rezultă pentru  $L_F$  și  $C_F$  valori în domeniul  $1...10 \text{ mH}$ , respectiv  $1...10\text{mF}$

O asemenea dimensionare a componentelor filtrului tampon asigură, totodată, o frecvență de rezonanță a circuitului de tracțiune,

$$f_0' = \frac{l}{2\pi\sqrt{(L_F + L_t)C_F}} \leq f_0, \quad (9.2)$$

inferioară frecvențelor de semnal din circuitul de tracțiune și eventualele circuite de cale (în cazul metroului). Astfel, pe de o parte se evită rezonanța serie (cu supratensiuni foarte mari ) a circuitului de tracțiune, iar, pe de altă parte, se obține, pentru frecvențele armonice dominante (de  $300\text{Hz}$  și  $600\text{Hz}$ ) generate în linia de contact de redresoarele de putere din stațiile de tracțiune electrică, o impedanță de intrare a vehiculelor electrice

cu chopper superioară celei a vehiculelor electrice cu rezistențe de pornire-frânare. Trebuie totuși remarcat că, la 50 Hz, impedanța de intrare a vehiculelor electrice cu chopper depinde sensibil de valoarea duratei relative de conducție,  $a=T_c/T$ , a chopperului. În plus, pentru evitarea cuplajului inductiv dintre filtrul tampon și bobine de netezire din circuitul motoarelor de tracțiune, se practică dispunerea reciproc ortogonală a bobinelor  $L_F$  și  $L_n$ .

În sistemele de acționare cu motoare de inducție alimentate prin invertoare de tensiune, frecvența fundamentală a inverterului crește în mod continuu de la 0 la un maxim de aproximativ 120Hz, pe măsură ce vehiculul accelerează. Peste valoarea nominală a motorului, inverterul comută de mai multe ori. Pentru a calcula armonicile de curent din sursă trebuie luat în considerare și acest mod de lucru la frecvență variabilă. În circuitul de forță se introduc pentru reducerea armonicilor curentului un filtru trece-jos, asemănător cu cel de la un chopper.

În concluzie, vehiculele electrice cu choppere și invertoare pot perturba electromagnetic circuitele de semnalizare (în speță, circuitele de semnalizare din rețeaua metropolitană):

1. Prin *perturbații conductive*, la frecvența de lucru a chopperului sau armonicile acesteia (respectiv subarmonicile generate de chopper atunci când funcționează cu frecvența de tact sub cea nominală, în perioada de demaraj a vehiculului electric) invadează banda de frecvență în care operează echipamentul circuitului de cale; aceste perturbații pot fi evitate prin funcționarea circuitului de cale fie la frecvență industrială, fie la audiofrecvențe de ordinul kHz. În plus, la anumite viteze ale vehiculului electric, componentele alternative pot avea frecvența de 50Hz și, ca urmare, pot

interferența electromagnetică cu semnale utile din circuitele conexe de semnalizare și telecomunicații de frecvență industrială. De aceea, în filtrul tampon se înglobează, uzual, un circuit rezonant L-C, acordat pe frecvența de 50Hz.

2. Prin *perturbații inductive*, datorită plasării sistemului de propulsie cu chopper sau invertor dedesubtul vehiculului electric, circuitul de cale aflându-se, astfel, sub înălțuirea magnetică a bobinelor (de filtrare, de netezire, de oscilație, de limitare a pantei de creștere a curentului) din circuitul de forță al vehiculului electric și sub acțiunea câmpurilor magnetice de dispersie ale cablurilor de legătură din acest circuit, limitarea zgomotelor electromagnetice induse în circuitul de cale se realizează prin ecranarea cu tablă de oțel silicios sau de cupru a bobinelor (îndeosebi a celor de netezire și oscilație), prin utilizarea cablurilor de conexiune ecranate și torsadate, prin înglobarea în aluminiu sau oțel a carcasei echipamentului de forță al chopperului, etc.

3. Datorită circuitului electric al chopperului și/sau invertorului, în care sunt comutați curenți de sute de amperi în câteva  $\mu$ s, vehiculul electric cu convertoare poate perturba prin radiație electromagnetică circuitele de telecomunicații din vecinătate. Reducerea acestora se obține utilizând un filtru de paraziți radio, în serie cu filtrul tampon și bobinele toroidale în circuitul de comutație al chopperului și/sau invertorului.

Armonicele produse de sistemele de acționare alimentate în c.a. constituie surse de zgomot și produc de asemenea putere reactivă care este smulsă sursei prin deteriorarea factorului de distorsiune de intrare. Sistemele de acționare cu convertoare semicomandate cu tiristoare și cu motoare de tracțiune de c.c. sunt

în mod particular surse puternice de armonici. Amplitudinea armonicilor sursei de curent în astfel de sisteme poate fi calculată analitic dacă se fac o serie de aproximații în ceea ce privește forma de undă a curentului. Armonicele impare produse au amplitudinea în funcție de întârzierea unghiului de aprindere și de unghiurile de suprapunere.

În sistemele de acționare alimentate în c.a. cu motoare de tracțiune de c.a. , inverterul lucrează cu PWM pentru a regla curentul cerut cu menținerea unui factor de putere apropiat de 1. Armonicele sursei de curent derivă în principal din funcționarea redresorului din moment ce armonicele de la inverter sunt absorbite de filtrul de legătură de c.c.

Principalele efecte de interferență în radiofrecvență se datorează în principal pantografului și catenarei și se referă la arcul electric care apare la ridicarea sau coborârea pantografului. Acesta determină producerea unor radiații de câmp apropiat și/sau câmp îndepărtat. Sursele de curent de mare și joasă tensiune, precum câmpurile produse de curenții de tracțiune și de arcul pantografului generează câmpuri apropiate, în timp ce sursele de curenți de valoare redusă și tensiuni înalte precum comutația, incluzând scânteile de întrerupere și formarea arcului electric, crează câmpuri îndepărtate.

Din punct de vedere fizic ceea ce determină interferența în radiofrecvență este, o explozie datorită inițierii arcului, ceea ce duce la un zgomot continuu generat de modificările în emisia de electroni în spoturile catodice. În timpul procesului de colectare a curentului, arcul continuă să se stingă la curent zero și apoi să se reaprindă corespunzător reaplicării tensiunii. Dacă vehiculul are o capacitate față de pământ, poate fi implicată o energie substanțială

și se vor observa arcuri electrice cu lungimi mai mari de 5cm la un nivel al curentului alternativ de tracțiune în jurul valorii de 300A.

Emisiile radiative în vehicule electrice pot apărea și datorită numeroaselor echipamente electrice, electronice și informatice instalate la bord. Astfel de echipamente sunt sistemele de acționare ale scaunelor, ferestrelor, ștergătoarelor de parbriz, oglinzilor, sistemele de siguranță cum ar fi acționarea airbag-urilor, sistemele moderne de evitare a coliziunilor, etc. Toate aceste sisteme sunt conectate la computerul de bord printr-o rețea complexă de cabluri care, la rândul ei, se constituie într-o importantă sursă de emisii radiative.

### **9.3. PERTURBAȚII ELECTROMAGNETICE ALE INSTALAȚIILOR FIXE DIN SISTEMELE DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ**

Se știe că instalațiile fixe ale unui sistem de tracțiune electrică cu vehicule electrice motoare neautonome au rolul de a prelua energia electrică din rețeaua electroenergetică generală, de a modifica natura curentului (dacă este necesar) și de a reduce nivelul tensiunii, corespunzător necesităților tracțiunii electrice, distribuind energia electrică liniei de contact pentru alimentarea vehiculelor .

SSTE - substațiile de tracțiune electrică, sunt în general echipate cu transformatoare trifazate de putere, echipamente de înaltă tensiune (întreruptoare tripolare de înaltă tensiune, separatoare mono sau tripolare, siguranțe fuzibile, etc) și redresoare (pentru cele de curent continuu). Transformatoarele și

redresoarele de putere se constituie în sarcini neliniare pentru rețeaua de alimentare, fiind resurse de armonici superioare care poluează rețeaua electroenergetică generală. Pe de altă parte fenomenele de comutație ale curentului în redresoarele de putere determină apariția curenților de mod normal și mod comun atât pe partea de alimentare cât și pe partea de tracțiune.

La funcționarea în regim simetric a transformatoarelor din substații și pentru redresoare identice, armonicile produse sunt funcție numai de numărul de pulsuri și de modul de conectare al redresoarelor. O sarcină inductivă de tracțiune de valoare mare cauzează o creștere a amplitudinii armonicilor cu curentul de sarcină. Spectrul de variație este afectat și de :

- Asimetria sau neechilibrul în circuitul redresorului, generând componente armonice mici la toate armonicile de frecvențe utile.
- Amplitudini diferite ale tensiunilor de fază, cauzând producerea de armonici pare ale frecvenței utile
- Condiții de operare anormale sau neobișnuite, precum situațiile de defect.

Linia trifazată de alimentare a substațiilor de tracțiune este afectată de unele efecte fizice precum efectul Corona, produs de întreruperea câmpului electric în apropierea conductoarelor și de întreruperea locală datorată microarcurilor electrice la contactele metalice sau la suprafețele izolatoare.

Transformatoarele din substații introduc aceste efecte în rețeaua de tracțiune pe lângă introducerea armonicilor superioare datorate formelor de undă distorsionate ale tensiunii de alimentare.

Linia de contact și șinele de cale transmit puterea la și de la vehiculele de tracțiune și pot genera sau mări perturbațiile electromagnetice, prin:

- Prezența curenților vagabonzi și modificarea sarcinii vehiculului de tracțiune, care determină apariția unor câmpuri magnetice neechilibrate în vecinătatea trenului

- Variația în timp a curentului de tracțiune în linie, poate acționa ca un generator de câmp

- Apariția unor tensiuni perturbatoare, datorate porțiunilor comune de circuit

Modificările rapide ale curentului și tensiunii în circuitul de sarcină se propagă la nivelul liniei de contact, generând radiații în radio frecvență. Trebuie luată de asemenea în calcul producerea de câmpuri apropiate sau îndepărtate datorită procesului de captare a curentului la interfața dintre catenară (LC) și pantograf .

### **9.3.1. Perturbații electromagnetice capacitive**

Această perturbație caracterizează cuplajul prin tensiune electrică perturbatoare dintre circuitul aerian de electroalimentare al unei rețele de tracțiune electrică (indiferent dacă este de c.c. sau c.a. monofazat) și un conductor, izolat față de pământ și inițial neîncărcat cu sarcină electrică, al unei linii electrice aeriene de joasă tensiune sau al unei linii de telecomunicații din vecinătate. Prin influența electrostatică (capacitivă) se produce încărcarea superficială cu sarcini electrice de semn contrar a diferitelor porțiuni ale conductorului respectiv, generînd o tensiune electrică a acestuia față de pământ.



Se consideră astfel, linia de contact LC a unei rețele de tracțiune electrică pentru care se specifică raza echivalentă  $r_{fc}$ , înălțimea  $b$  în raport cu solul și tensiunea  $U_{LC}$  față de pământ ( $V_{pământ} = 0$ ) și un fir conductor al unei linii electrice (LE) de joasă tensiune aflat în câmpul său electrostatic, izolat față de pământ, la înălțimea  $c$  față de pământ și distanța  $d$  pe orizontală față de firul LC (figura 9.3.).

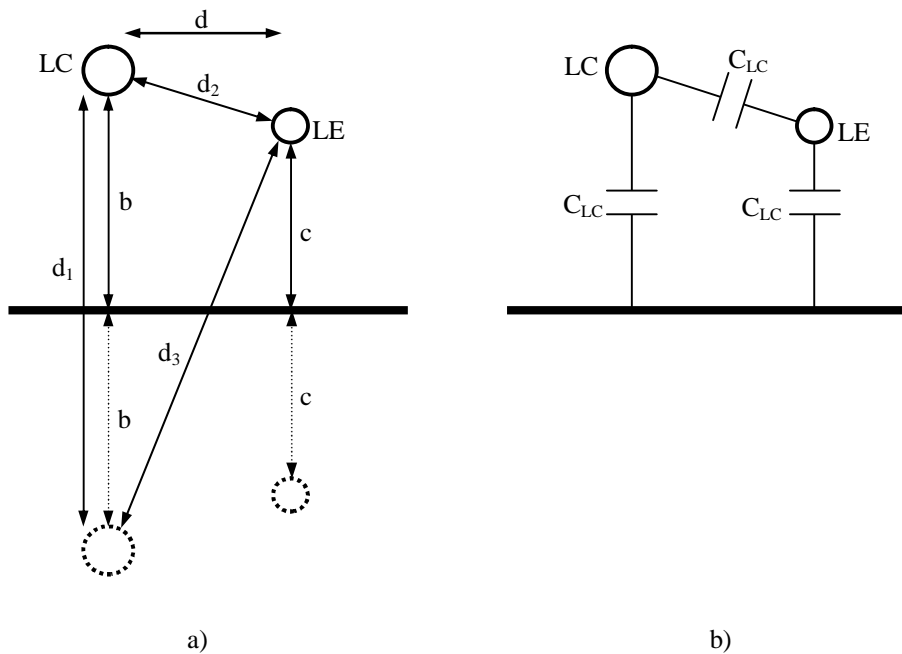


Figura 9.3. Sistemul linie de contact (LC) - Linie electrică de joasă tensiune (LE).

Tensiunea  $U_{LE}$  față de pământ a acestui fir conductor, indusă electrostatic de LC, se poate determina din relațiile lui Maxwell pentru sisteme conductoare aflate în echilibru electrostatic.

Ecuatiile de capacitate ale lui Maxwell, reprezintă relațiile de legătură între sarcinile electrice și potențialele unui sistem de  $n$  conductoare situate într-un mediu dielectric izotrop și liniar și de

asemenea, neîncărcat electric și fără polarizație permanentă. Cunoașterea acestor relații[24],[44], permite să se determine sarcinile electrice pentru fiecare conductor dacă se cunosc potențialele tuturor conductoarelor sau invers, dacă sunt date sarcinile conductoarelor să se poată calcula potențialul fiecărui conductor. În conformitate cu teorema unicității, soluția acestei probleme este unică. Pe baza ecuațiilor lui Maxwell nu se poate determina repartiția sarcinii pe conductoare sau potențialul într-un punct oarecare din dielectric. Dacă sistemul de conductoare se găsește în apropierea pământului e necesar să se țină seama și de acesta, pământul fiind considerat ca un conductor distinct, având potențialul egal cu zero, și care posedă o sarcină electrică (separată prin influența electrostatică) egală și de semn contrar cu suma sarcinilor tuturor conductoarelor sistemului.

Se consideră mediul dielectric dintre conductoare ca fiind liniar, ceea ce presupune existența unor relații liniare între sarcini și potențiale, iar scrierea acestora în forma generală necesită cunoașterea semnificației și a expresiilor de calcul unde e posibil pentru coeficienții care intervin în aceste relații. Acești coeficienți sunt deci mărimi caracteristice ale sistemului considerat, fără a depinde de sarcini și potențiale, ci numai de configurația geometrică a sistemului de conductoare și de natura mediului dielectric. Relațiile lui Maxwell se pot scrie în trei forme.

Revenind la perturbațiile capacitive în sisteme de tracțiune, considerând sistemul prezentat în figura 9.3. și utilizând prima formă de scriere a ecuațiilor lui Maxwell se obține:

$$\begin{aligned} U_{LC} &= s_{LC LC} Q_{LC} + s_{LC LE} Q_{LE} \\ U_{LE} &= s_{LE LC} Q_{LC} + s_{LE LE} Q_{LE} \end{aligned} \quad (9.3)$$

În baza condiției de sarcină electrică  $Q_{LE} = 0$ , nemodificată de influența electrostatică, din egalitățile (9.3) rezultă , prin împărțire membru cu membru:

$$U_{LE} = \frac{s_{LELC}}{s_{LCLC}} U_{LC} \quad (9.4)$$

Coeficienții de potențial  $s_{LCLC}$  și  $s_{LELC}$  se determină prin metoda imaginilor:

$$s_{LCLC} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{d_1}{r_{fc}} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{2b}{r_{fc}} \quad (9.5)$$

$$s_{LELC} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{d}{d_2} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{\sqrt{d_2 + (b+c)^2}}{\sqrt{d_2 + (b-c)^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon l} \ln \frac{d_2 + (b+c)^2}{d_2 + (b-c)^2}$$

unde

$l$  - lungimea de paralelism între LC și LE;

$\epsilon$ - permitivitatea mediului dintre ele.

Se obține deci pentru  $U_{LE}$  relația

$$U_{LE} = U_{LC} \frac{\ln \frac{d_2 + (b+c)^2}{d_2 + (b-c)^2}}{2 \ln \frac{2b}{r_{fc}}} \quad (9.6)$$

Dacă în apropierea unei LE de joasă tensiune se află mai multe linii paralele influența electrostatică exercitată asupra LE crește. Relația (9.6) arată că valoarea tensiunii indusă electrostatic de LC a unei rețele de tracțiune electrică în conductoarele de joasă tensiune din vecinătate nu depinde nici de natura curentului electric de tracțiune din LC, nici de lungimea de paralelism între cele două conductoare, ci depinde numai de configurația sistemului ( definită prin  $r_{fc}$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  ).

Pentru valori numerice uzuale în tracțiunea electrică feroviară de c.a. monofazat:  $b=6.5$  m;  $c=6$ m;  $r_{fc}=6$ mm;  $U_{LC}=25$ KV și  $d=10$ m, rezultă  $U_{LE}=1.56$  KV, adică o tensiune electrică suficient de mare pentru a provoca intrarea în funcțiune a aparatelor de protecție de pe LE de joasă tensiune. O asemenea influență electrostatică perturbatoare apare mai ales în regimul tranzitoriu de punere sub tensiune a LC din rețeaua de tracțiune electrică.

Sistemul de conductoare reprezentat de LC și LE în prezența pământului (fig.9.4a) este echivalent din punct de vedere al sarcinilor totale și tensiunilor electrice cu ansamblul de condensatoare caracterizat prin capacitatea parțială lineică de cuplaj între LC și LE,  $C_{LC,LE} = C_{LE,LC}$  și capacitățile parțiale lineice față de pământ a LC,  $C_{LC0}$  și ale LE,  $C_{LE,0}$  (fig.9.4 b). Ca urmare ecuațiile lui Maxwell pot fi scrise conform :

$$Q_{LC} = C_{LC0} U_{LC} + C_{LCLE} (U_{LC} - U_{LE}) \quad (9.7)$$

$$Q_{LE} = C_{LELC} (U_{LE} - U_{LC}) + C_{LE0} U_{LE}$$

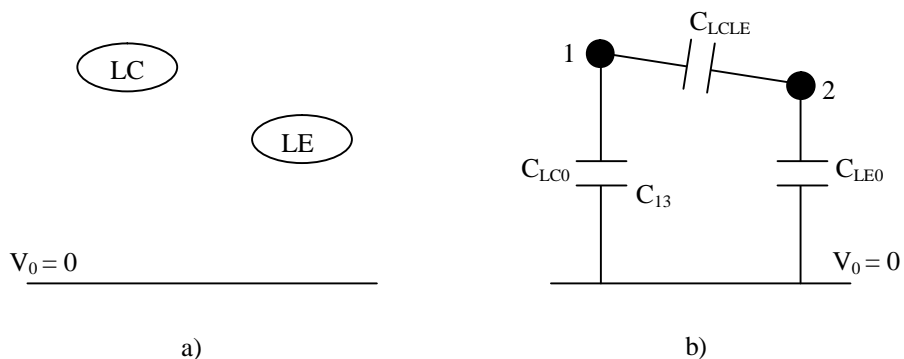


Figura. 9.4. Sistemul celor două conductoare izolate față de pământ (a) și schema echivalentă cu capacități parțiale corespunzătoare acestuia (b)

Ultima relație din (9.7) conduce la o altă expresie de calcul pentru tensiunea indusă electrostatic :

$$U_{LE} = U_{LC} \frac{C_{LCLE}}{C_{LCLE} + C_{LE0}} \quad (9.8)$$

care justifică denumirea alternativă de cuplaj capacitiv atribuită influenței electrostatice a LC asupra LE din vecinătate. Se precizează că pentru rețeaua de tracțiune electrică feroviară în c.a. monofazat, este uzuală inegalitatea de capacități lineice parțiale  $C_{LC,LE} < 0.1 C_{LE,0}$ . Pentru LE aflată sub influența electrostatică a LC din rețeaua de tracțiune electrică se evidențiază două cazuri, în care prin LE se poate închide la pământ un curent capacitiv :

- capetele LE sunt puse la pământ (de exemplu în cazul unei linii de telegraf)
- LE este atinsă de un om aflat în contact cu pământul. În ambele cazuri, curentul capacitiv ce se închide la pământ are aceeași expresie de calcul:

$$I_{LE} = U_{LC} \omega C_{LCLE} l [A] \quad (9.9)$$

unde  $\omega$  reprezintă pulsația curentului monofazat de tracțiune din LC

Pentru următoarele valori numerice :  $b=c=6$  m,  $l=1.5$  Km,  $U_{LC} = 25$  KV și  $d=10$  m, valoarea curentului capacitiv este 5.5 mA. Această valoare a curentului capacitiv se închide la pământ :

- În cazul când el circulă printr-un conductor izolat al unei linii de telecomunicații cu capetele puse la pământ, reprezintă o valoare suficient de mare pentru a perturba funcționarea normală a liniei

- În cazul când el se scurge prin corpul omului care stă pe pământ și atinge LE , reprezintă o valoare inferioară limitei de pericolozitate pentru om (estimată la cca. 10mA).

Ca măsuri de reducere a influenței electrostatice a LC asupra LE de joasă tensiune din vecinătate izolată față de pământ :

- introducerea LE în cablu ecranat
- mărirea distanței  $d$  dintre LC și LE
- micșorarea înălțimii față de sol,  $c$ , a LE
- plasarea unui conductor de protecție legat la pământ în apropierea LE sau între LC și LE.

### 9.3.2. Perturbații electromagnetice inductive

Câmpul magnetic variabil în timp creat de curentul de tracțiune induce în circuitele electrice de joasă tensiune (cu punct de legare la pământ) din vecinătate, t.e.m. a căror expresie rezultă din aplicarea teoremelor lui Kirchhoff și/sau a legii inducției electromagnetice pe circuitul echivalent al sistemului linie de contact- linie electrică de joasă tensiune- șină de cale. În sistemele de tracțiune de c.a. perturbațiile inductive se regăsesc sub forma unei t.e.m. induse longitudinale în liniile electrice de joasă tensiune din vecinătate, în timp ce în sistemele de tracțiune de c.c. perturbațiile inductive apar datorită prezenței armonicilor superioare ale curentului de tracțiune.

Se consideră două sisteme, 1 și 2, primul fiind parcurs de un curent de câteva ori mai mare decât cel ce parcurge sistemul 2. Cuplajul inductiv –magnetic apare între două sau mai multe bucle conductoare parcurse de curenți. Fluxurile magnetice produse de curenți determină în buclele conductoare învecinate apariția unor tensiuni perturbatoare.

După cum se poate observa din figura 9.5 a și b, efectul inductiv al fluxurilor se modelează într-o schemă echivalentă fie

printr-o inductivitate mutuală, fie printr-o sursă de tensiune perturbatoare. Expresia tensiunii induse poate fi scrisă în domeniul frecvență ca :

$$\underline{U}_p(\omega) = \underline{I}_1(\omega) j\omega M_{12} \quad (9.10)$$

Iar în domeniul timp

$$u_p(t) = \frac{di_1(t)}{dt} M_{12} \quad (9.11)$$

Perturbația inductivă se manifestă printr-o tensiune perturbatoare de mod normal în sistemul 2 care se regăsește la intrarea receptorului, divizată corespunzător raportului  $Z_2 / Z_R$ .

Inductivitatea mutuală depinde de configurația sistemului în ansamblu și de mediul dintre cele două bucle conductoare și se poate calcula utilizând

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}(\omega)}{I_1(\omega)} \quad (9.12)$$

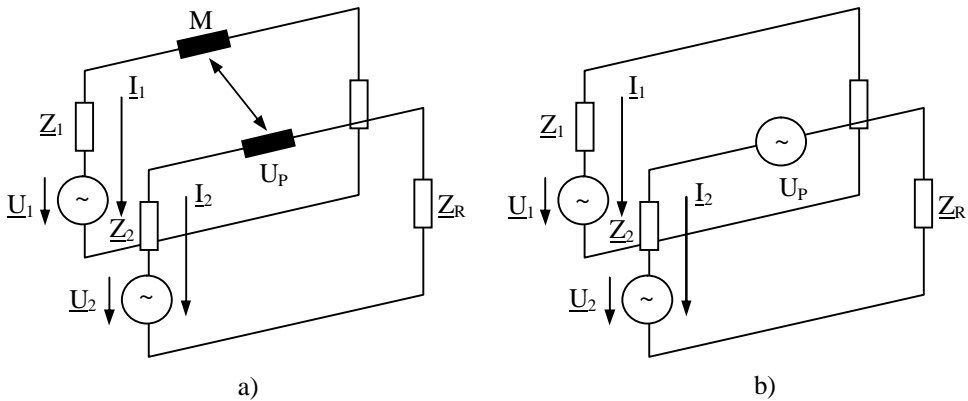


Figura 9.5. Modelare cuplaj magnetic între două circuite:  
prin inductivitate mutuală (a) prin sursă de tensiune perturbatoare (b)

Unde  $\Phi_{12}$  este fluxul dat de circuitul 1 care înlănțuie circuitul 2. Fluxul,  $\Phi_{12}$  se calculează cu ajutorul integralei de suprafață :

$$\Phi_{12} = \int_{A_2} \overline{B} d\overline{A}. \quad (9.13)$$

pe suprafața buclei conductoare a sistemului 2.

*Perturbații inductive ale instalațiilor fixe de tracțiune electrică de c.a.* În cazul LC de c.a. pentru a determina expresia t.e.m. longitudinale,  $E_1$  induse într-o LE de joasă tensiune se consideră circuitul electric echivalent prezentat în figura 9.6. Putem scrie:

$$E_1 = j\omega M l (\underline{I}_{LC} + \underline{I}_s) \quad (9.14)$$

unde:

$\omega$ ,  $\underline{I}_{LC}$  – pulsația, respectiv valoarea efectivă a curentului de tracțiune

$l$  – lungimea de cvasiparalelism a sistemului linie de contact- linie electrică

$M$  – inductanța mutuală lineică între cele două circuite ( circuit de tracțiune LE de joasă tensiune ), ca funcție de configurație a sistemului

$\underline{I}_s$  – valoarea efectivă a curentului în șina de cale

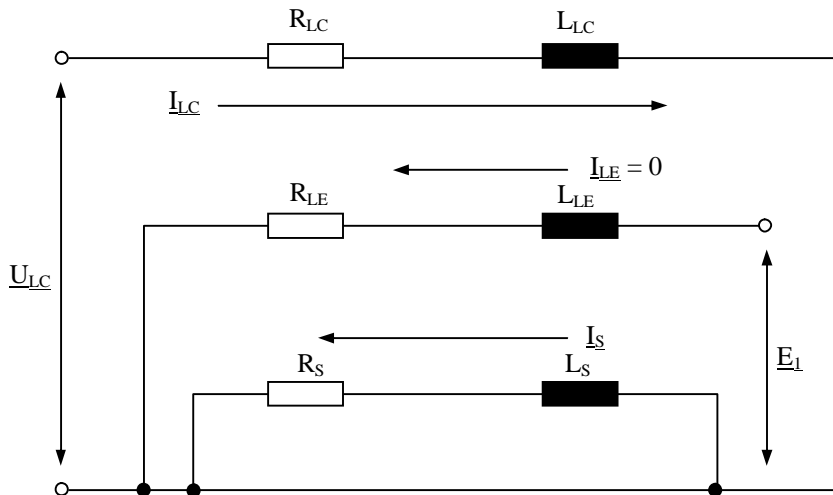


Figura 4.4. Circuit electric echivalent pentru studiul perturbațiilor inductive în sisteme de tracțiune electrică de c.a.

Din teorema lui Kirchhoff pe circuitul închis șină-pământ rezultă



$$\underline{Z}_S \underline{I}_S + j\omega l M' \underline{I}_{LC} = 0 \quad (9.15)$$

cu:

$\underline{Z}_S = R_S + j\omega L_S$ , impedanța șinei de cale ( $R_S$  – rezistența porțiunii de șină de cale considerată, iar  $L_S$  – inductivitatea lineică a șinei de cale)

$M'$  – inductivitatea lineică (pe unitatea de lungime) mutuală linie de contact – șină de cale

Rezultă:

$$\underline{I}_S = - \frac{j\omega l M' \underline{I}_{LC}}{\underline{Z}_S} \quad (9.16)$$

Având în vedere că rezistența  $R_S$  a șinei este neglijabilă, rezultă:

$$\underline{E}_l = j\omega l M \left( l - \frac{M'}{L_S} \right) \underline{I}_{LC} = j\omega l M k \underline{I}_{LC} \quad (9.17)$$

Se poate, deci scrie pentru valoarea efectivă a tensiunii electromotoare induse longitudinală :

$$E = \omega l M k \underline{I}_{LC} \quad (9.18)$$

$k$  - coeficient reductor al t.e.m. dat de  $k = k_s k_c k_e$  unde,

$k_s$  - coeficient datorat curenților induși în instalațiile metalice la sol sau îngropate din vecinătate (0.2-0.9);

$k_c$  - coeficient datorat curenților induși în mantaua și armătura LE în cablu (0.5);

$k_e$  - factor de ecranare datorat prezenței în apropierea LC a unor corpuri aflate la potențialul pământului.

*Perturbații inductive ale instalațiilor fixe de tracțiune electrică de c.c.* În cazul LC de c.c. cuplajul magnetic se realizează (în circuitul de tracțiune al ramei de metrou) între armonici. Fie  $I_v$  una din armonicile superioare ale curentului redresat de tracțiune (vezi figura 9.7). Câmpul magnetic creat are o geometrie plan-paralelă, cu linii de câmp cercuri concentrice cu

centrul în șina de contact. Fie P un punct situat între cele două șine de cale, la distanța  $x$  pe orizontală față de șina de contact, pe cercul de rază  $r$ . Inducția magnetică în punctul P este dată de relația:

$$B_P = \frac{\mu_0 I_v}{2\pi r} \quad (9.19)$$

cu  $\mu_0$  – permeabilitatea magnetică a mediului;

*Armonici superioare ale curentului de tracțiune ce parcurg șina de contact și circuitul de cale, reprezentat de șinele de cale*

Fluxul magnetic total de înlănțuire a circuitului de cale, pe lungimea  $l$ , se poate determina astfel:

$$\begin{aligned} \psi_v &= \int_d^{d+e} \bar{B}_P \bar{dA} = \int_d^{d+e} B_P dA \cos \alpha = \frac{\mu_0 I_v l}{2\pi} \int_d^{d+e} \frac{x}{h^2 + x^2} dx = \\ &= \frac{\mu_0 I_v l}{4\pi} \ln \frac{h^2 + (d+e)^2}{h^2 + d^2} \end{aligned} \quad (9.20)$$

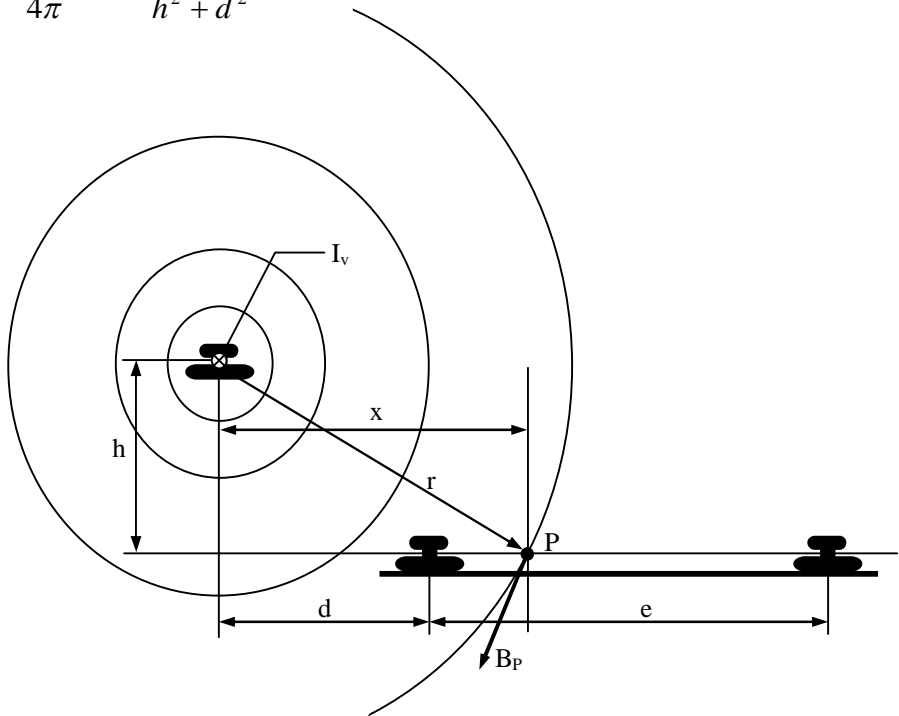


Figura 9.7. Câmpul magnetic al armonicii  $I_v$  a curentului de tracțiune în planul dintre șinele de cale

Tensiunea t.e.m. indusă de acest flux magnetic în circuitul de cale este dată de relația:

$$E_v = \omega_v \psi_v = \mu_0 I_v l f_v \ln \frac{h^2 + (d + e)^2}{h^2 + d^2} \quad (9.21)$$

Curentul indus în circuitul de cale:

$$\Delta I_v = \frac{E_v}{\omega_v l L_S} \quad (9.22)$$

cu  $L_S$  –inductanța lineică a circuitului de cale. Pentru valori numerice uzuale  $h=d=0.3\text{m}$ ,  $e= 1.453\text{m}$  și  $L_S = 1.3 \text{ H/m}$  se obține

$$\frac{\Delta I_v}{I_v} = 22\%$$

*Observație.* Șinele de cale sunt utilizate atât ca și circuite de retur al curentului de tracțiune, precum și ca circuite de semnalizare și control ale traficului. Astfel, șinele de cale sunt de obicei divizate în segmene izolate prin joante izolante, numite blocuri. Pe fiecare astfel de bloc este instalat un sistem de control automat, format dintr-un circuit emițător și unul receptor (fig.9.8. a), cu rolul de a sesiza prezența sau lipsa unei rame electrice în blocul respectiv.

Atunci când blocul este neocupat (figura 9.8.a), armonicile de curent din circuitul de cale se vor închide pe circuitul emițător-șina 1-receptor-șina 2-emițător. În condiții normale acest curent va determina cuplarea releului, semnalizând „bloc neocupat”. Dacă o ramă electrică intră în blocul respectiv (figura 9.8.b), din oricare direcție, curentul se va închide pe circuitul emițător-șina 1-roata 1-osie-roata 2-șina 2- emițător. În acest caz releul este decuplat semnalizând „bloc ocupat”.

Dacă luăm în considerare curentul indus în circuitul de cale prin perturbație inductivă, în situația în care în blocul respectiv

întră o ramă electrică curentul indus va căuta o cale de închidere prin receptor, determinând cuplarea releului și apărând astfel pericolul unei coliziuni.

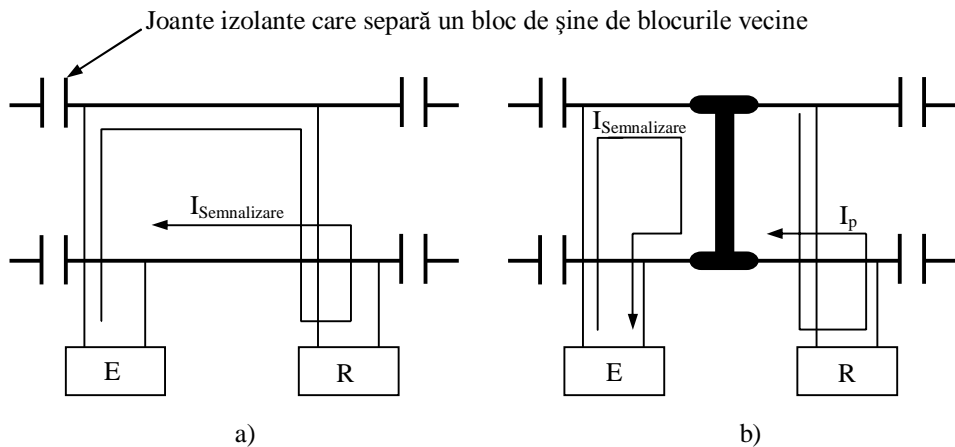


Figura 9.8. Principiul de funcționare al circuitului de semnalizare și control în sistemele de tracțiune cu șine de cale

Pentru reducerea influenței inductive a circuitului de tracțiune asupra circuitelor de joasă tensiune din vecinătate se utilizează:

- mărirea distanței între cele două circuite;
- ecranarea în cablu a LE de joasă tensiune;
- legarea la șina metalică a CR, a LE de joasă tensiune și a echipamentelor aferente amplasate la distanțe mai mici de 5m de axa CR, respectiv legarea la prize de pământ a celor mai îndepărtate;
- montarea în circuitele de joasă tensiune a unor transformatoare de separare.

### 9.3.3. Perturbații electromagnetice conductive

Perturbațiile conductive, sau galvanice, apar atunci când circuitul de tracțiune electrică și un alt circuit au în comun un conductor sau o impedanță, ceea ce determină apariția unei tensiuni perturbatoare în circuitul de joasă putere, egală cu cea generată pe partea comună a circuitului. În funcție de circuitele între care apar, putem deosebi:

- *Perturbații conductive între circuite de alimentare* , de exemplu perturbațiile care apar în circuitele de semnalizare și control care se închid pe șinele de cale
- *Cuplaj galvanic între circuite de alimentare și circuite de punere la pământ* , așa numitul cuplaj prin bucla de pământare; acesta apare întotdeauna când tensiunile de mod comun provoacă curenți nedorți prin puneri la pământ multiple ale conductorului de referință, ale ecranului cablurilor și ale carcaselor aparatelor, etc.
- *Cuplaj galvanic datorat curenților vagabonzi*

#### *Perturbații conductive în circuitele de alimentare.*

Vom considera o secțiune  $i$  a șinelor metalice, de lungime  $l$ , separată de secțiunile  $i-1$  și  $i+1$  prin joante izolante, echipată cu circuite de cale bifilare (figura 9.9.a) . Circuitele de cale constau dintr-o sursă de tensiune- emițător conectată între șinele de cale la un capăt al secțiunii și un receptor la celălalt. Prezența vehiculului în orice poziție în secțiunea  $i$  determină întreruperea funcționării receptorului prin șuntarea curentului de la emițător prin sistemul roți-osie. Așadar, orice defect în circuitul de cale, inclusiv o

Înterupere a șinelor, poate provoca o funcționare defectuoasă a receptorului.

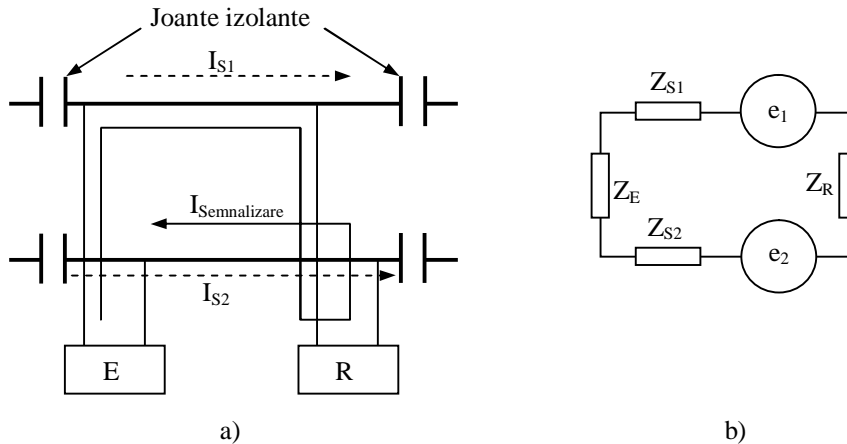


Figura 9.9. Perturbațiile conductive în sisteme de tracțiune  
Schema electrică echivalentă

Notând cu  $Z_{S1}$ ,  $Z_{S2}$ , și  $e_1$ ,  $e_2$  impedanțele respectiv căderile de tensiune pe cele două șine, cu  $Z_E$  și  $Z_R$  impedanțele emițătorului, respectiv ale receptorului, circuitul echivalent este prezentat în figura 9.9.b. Având în vedere că atât impedanțele cât și curenții de tracțiune care se închid pe cele două șine nu au aceeași valoare, căderile de tensiune  $e_1$  și  $e_2$  au valori diferite. Diferența dintre cele două valori apare ca o tensiune perturbatoare ce duce la apariția unui curent perturbator în circuitul de cale:

$$i_p = \frac{e_1 - e_2}{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_R + Z_E} \quad (9.23)$$

care poate determina funcționarea defectuoasă a sistemului de semnalizare și control.

*Observație.* În cazul ideal, impedanțele celor două șine și căderile de tensiune pe acestea au valori identice, astfel că

diferența este zero. Dar, având în vedere faptul că cele două șine nu sunt identice, iar forțele de apăsare pe șine ale roților sunt diferite, diferența  $e_1 - e_2$  se regăsește pe circuitul de semnalizare sub forma unui curent perturbator care poate interfera negativ cu circuitele de cale.

Atunci când blocul este neocupat (fig. 9.8. a), armonicile de curent din circuitul de cale se vor închide pe circuitul emițător-șina1-receptor-șina2-emițător. În condiții normale acest curent va determina cuplarea releului, semnalizând “bloc neocupat”. Dacă o ramă electrică intră în blocul respectiv (fig. 9.8. b) din oricare direcție, curentul se va închide pe circuitul emițător-șina1-roata1-osie-roata2-șina2-emițător. În acest caz releul este decuplat semnalizând “bloc ocupat”.

Luând însă în considerare curentul perturbator în circuitul de cale ce apare datorită perturbației conductive, în situația în care în blocul respectiv intră o ramă electrică curentul perturbator conductiv va căuta o cale de închidere prin receptor, determinând cuplarea releului și apărând astfel pericolul unei coliziuni.

*Perturbații conductive în circuitele buclor de alimentare.*  
Instalațiile electrice din imediata vecinătate a instalațiilor sistemelor de tracțiune electrică sunt conectate la pământ pentru a asigura protecția la tensiuni de atingere. În acest scop, sunt realizate dispozitive speciale de pământare și se impun norme stricte în ceea ce privește valoarea rezistenței de punere la pământ. În același timp, datorită rezistenței electrice reduse șină-pământ, șinele permit preluarea în întregime sau parțial a funcției unui dispozitiv de punere la pământ, cu cheltuieli de investiție minime. Pentru menținerea siguranței în substații, este indicat ca instalațiile metalice să fie conectate la șine, ceea ce echivalează practic cu

utilizarea șinelor ca singura legătură la pământ pentru rețeaua de instalații.

La circuitele de cale legate la pământ prin impedențe de legătură, la granița dintre două secțiuni ale șinelor de cale se instalează impedențe de legătură (figura 9.10). Pentru a studia modul în care pământarea influențează funcționarea circuitelor de cale se va folosi schema echivalentă din figura 9.11 pentru secțiunea  $i$  a circuitului de cale. Impedanța punctului  $a$  față de pământ este notată cu  $Z_{i-1, \text{împ}}$  și ea reprezintă impedanța echivalentă a șinelor și a impedenței de legătură în secțiunea  $i-1$ . În mod similar se definește  $Z_{i+1, \text{împ}}$ , impedanța punctului  $b$  față de pământ ca fiind impedanța echivalentă a șinelor și a impedenței de legătură în secțiunea  $i+1$ . La acestea se adaugă rezistențele de legare la pământ,  $R_{p1}$  și  $R_{p2}$  ale punctelor  $a$  și  $b$ , prin legăturile de împământare de la capetele circuitului de cale.

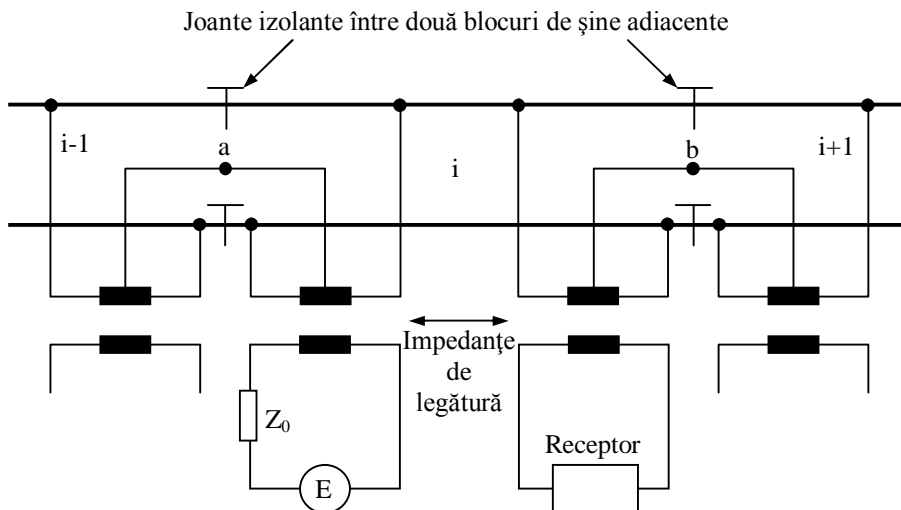


Fig 9.10. Tronson de șine de cale. Circuitul de semnalizare și control



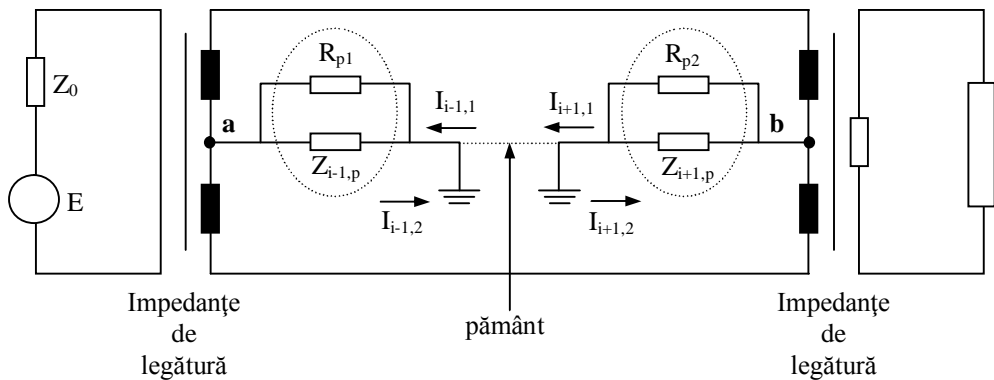


Figura 9.11 Perturbațiile conductive ale buclor de pământare pentru  
circuite de cale legate la pământ prin impedanțe de legătură  
Schema electrică echivalentă

În urma cercetărilor făcute în domeniu se pot trage următoarele concluzii :

- Circuitele de cale ale stațiilor de tracțiune permit o valoare scăzută a rezistenței de legare la pământ, astfel încât  $R_{p1} = R_{p2} = 0.5 \Omega$  sunt valori acceptabile chiar și în cele mai nefavorabile condiții.
- Circuitele de cale pentru sistemele automatizate cu o lungime mai mare , peste 4.5 km, permit conectarea la mijlocul impedanței de legătură dacă rezistența de legare la pământ nu este mai mică decât 10  $\Omega$ .
- În cazul în care legăturile la pământ sunt realizate numai la una dintre impedanțele de legătură, aceste valori sunt de 0.3  $\Omega$  pentru stațiile de tracțiune și de 3  $\Omega$  pentru sistemele automatizate.

Alt caz este acela în care fiecare instalație metalică este legată independent la pământ prin propria instalație de legare la pământ. În figura 4.10 se prezintă un circuit electric echivalent cu  $G_{p1}, G_{p2}, \dots, G_{pi}, \dots, G_{pn}$ , fiind conductanțele de punere la pământ

corespunzătoare fiecărei instalații legate independent la pământ. Aceste conductanțe nu au valori care diferă foarte mult, astfel că se pot considera egale și se vor nota  $g_p$ .

Consecințele negative ale acestei metode de realizare a legăturii la pământ sunt următoarele:

- Conductivitatea totală a liniei crește;
- Se introduce o asimetrie;
- Crearea unui circuit suplimentar în cazul întreruperii șinei, ceea ce determină apariția unei funcționări defectuoase nedetectabilă. Dacă, de exemplu apare o întrerupere în punctul d din figura 4.10 circuitul suplimentar care apare este creat în principal prin  $G_{p1}$  și  $G_{p2}$ .

Posibilitatea unei funcționări defectuoase depinde de conductivitatea legăturii la pământ. La valori scăzute probabilitatea este mică, pe câtă vreme valorile mari determină probabilități mari.

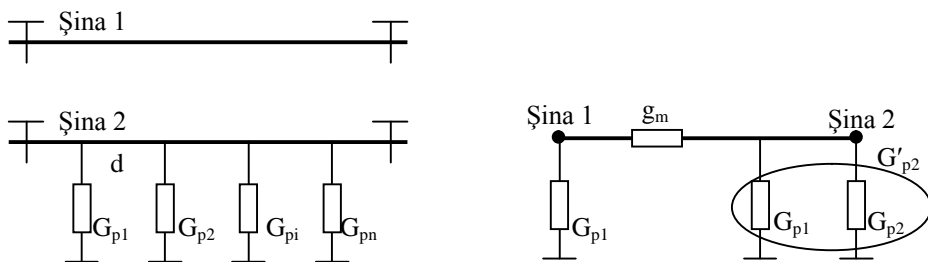


Figura 9.12. Circuitul electric echivalent pentru studiul perturbațiilor conductive în cazul buclelor de pământare pentru circuite de cale legate direct la pământ

Cercetările au dus la următoarele concluzii :

- Circuitele de cale ale stației permit valori de legare la pământ de  $r_p = 1 \Omega/\text{km}$ , ceea ce înseamnă că valoarea reală a

rezistenței de legare la pământ a unui stâlp este de  $20\ \Omega$

-Circuitele de cale ale blocurilor automatizate permit valori de legare la pământ de  $r_p = 20\ \Omega/\text{km}$ , ceea ce înseamnă că valoarea reală a rezistenței de legare la pământ a unui stâlp este de  $400\ \Omega$ . Pentru lungimea unui circuit de cale de  $2\ \text{km}$ ,  $r_p$  este de  $10\ \Omega/\text{km}$ , iar pentru lungimea unui circuit de cale de  $1.5\text{km}$ ,  $r_p$  este de  $5\ \Omega/\text{km}$ .

*Perturbații conductive datorate curenților vagabonzi.* Cablurile electrice, conductoarele de nul și alte instalații metalice la sol sau îngropate, aflate în vecinătatea unui circuit de tracțiune sunt cuplate galvanic cu circuitul de retur al curentului de tracțiune prin porțiunile comune de circuit electric din sol.

Șina metalică a căii de rulare pentru vehicule electrice neautonome pe cale ghidată nu este izolată față de pământ, astfel că, o fracțiune din curentul de tracțiune de retur este deviat din șină în sol sub forma unor curenți de dispersie (figura 9.13).

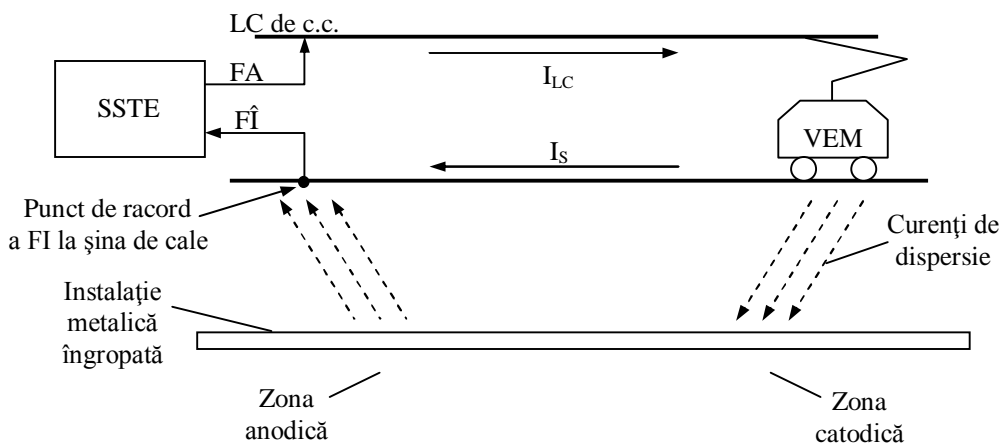


Figura 9.13 Curenți vagabonzi în sisteme de tracțiune electrică

În cazul unor sisteme de tracțiune electrică alimentate în curent alternativ, în care nu se iau măsuri de protecție, acești curenți determină apariția unor tensiuni electromotoare induse perturbatorii în circuitele electrice de joasă tensiune din vecinătatea căii de rulare.

La sisteme de tracțiune electrică de curent continuu, curenții de dispersie se află la originea fenomenelor de coroziune electrolitică a instalațiilor metalice îngropate (conducte, cabluri electrice sau telefonice) situate în vecinătatea substațiilor de tracțiune electrică de curent continuu. Aceste zone sunt așa numitele zone anodice, în care instalațiile metalice subterane cedează curent în sol. Fenomenul de electrocoroziune presupune migrarea progresivă în soluția electrolitică din sol a cationilor din rețeaua cristalină a metalului instalațiilor metalice îngropate. Protecția împotriva electrocoroziunii prin curenți de dispersie se realizează prin următoarele metode :

- Concentrarea unei fracțiuni cât mai mari a curentului de retur prin șinele metalice ale CR (sudarea sau eclisarea electrică a joantelor, creșterea rezistenței electrice șină-sol până la o valoare limită);
- Evitarea pătrunderii curenților vagabonzi în instalațiile metalice îngropate (izolarea lor cu învelișuri protectoare izolante);
- Redistribuirea judicioasă a câmpului de curenți de dispersie cu scopul imprimării unui potențial catodic protectiv pe zone cât mai extinse ale instalațiilor metalice îngropate. Una din metodele cel mai des utilizate este cea a drenajului electric, care constă în realizarea unei legături între instalația metalică îngropată și punctul de racord al fiderului de întoarcere la șina CR. Astfel,

curenții de dispersie, în cea mai mare parte, sunt drenați pe cale electrică prin legătură.

- Conductoare între instalația metalică îngropată și șina CR

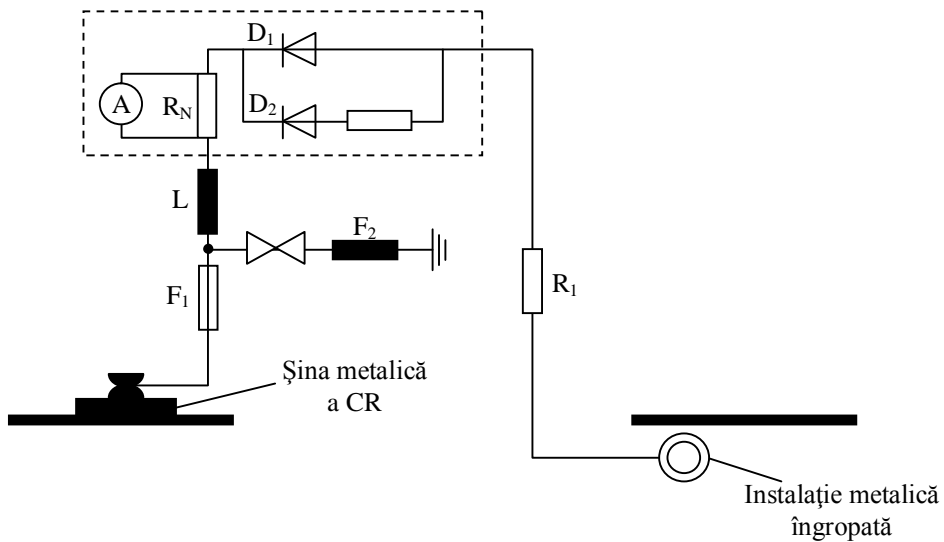


Figura 9.14 Drenaj electric pentru reducerea curenților vagabonzi

O asemenea celulă de drenaj electric este prezentată în figura 9.14. Înserierea pe legătura de drenaj a unei celule redresoare evită pericolul de electrocoroziune în cazul inversării sensului curenților vagabonzi.

Pentru protecția la supratensiuni accidentale a CR se înseriează un dispozitiv de protecție între șina CR și postul de drenaj (fuzibilul  $F_1$  și eclatorul cu vârfuri  $F_2$ ). Pentru limitarea curentului de drenaj se înseriează rezistența  $R_1$  și pentru ca legătura să nu constituie o punere la pământ, se înseriează o bobină de reactanță  $L_1$ .

## 9.3.4. Perturbații radiative

Sursele principale de perturbații radiative ale instalațiilor fixe într-un sistem de tracțiune electrică sunt:

- Substațiile de tracțiune, datorită transformatoarelor și convertoarelor de mare putere cu care sunt echipate. Comutația curenților în redresoarele de putere și echipamentele de protecție și control (întreruptoare de înaltă tensiune, întreruptoare rapide de curent continuu, transformatoare de măsură, etc), se constituie în importante surse de emisii radiative

- Linia/ șina de contact, alimentată în curent continuu sau în curent alternativ, respectiv calea de rulare, reprezintă și ele importante surse de perturbații electromagnetice de natură radiativă în instalațiile fixe. La trenurile de mare viteză, echipate cu mașini de tracțiune rotative și alimentate printr-o linie de contact situată deasupra vehiculului, s-au constatat emisii sub formă de câmpuri magnetice în interiorul trenului cu amplitudini care cresc proporțional cu distanța față de podea. Câmpul magnetic tinde să fie mai puternic în apropierea tavanului, cu valori cuprinse între câțiva  $\mu\text{T}$  până la zeci de  $\mu\text{T}$  [18], cu valori mai mari în vagoanele motorizate (datorită pantografului și cablurilor de legătură între acesta și restul echipamentului). Pentru sistemele tip maglev, alimentate prin șină de contact laterală și echipate cu bobine de sustentație și ghidare pe calea de rulare, câmpul magnetic are valori mai mari în apropierea podelei și reduse în apropierea tavanului. De exemplu, primele materiale publicate asupra unui posibil coridor de transport tip maglev între Quebec și Windsor Canada precizau valori de 60000  $\mu\text{T}$  la nivelul podelei și 20000  $\mu\text{T}$  la nivelul scaunelor. Pentru sistemul Chuo

Shinkansen valorile câmpului magnetic în vagoanele pentru pasageri este limitat sub 1000  $\mu\text{T}$ . În sistemele de transport de viteză medie, valorile inducției câmpului magnetic sunt comparabile cu cele prezentate anterior. Pentru trenurile electrice ușoare (Light rail vehicle), valorile câmpului magnetic sunt mai mici, datorită tensiunilor și curenților mai mici ce se vehiculează în astfel de sisteme.

- Sistemele de încărcare pentru vehiculele electrice, de tip inductiv sau conductiv, reprezintă o altă sursă de emisii radiative. Ambele tipuri de sisteme sunt echipate cu controler de încărcare și cu sisteme de comunicații între vehicul și sursă. Măsurători efectuate în timpul procesului de încărcare au demonstrat prezența unor emisii radiative mai mari decât normele impuse în domeniul alocat sistemelor radio private (de exemplu al celor utilizate în supermarketuri, mall-uri).

### 9.4. NORME ȘI STANDARDE ÎN STE

Organismele europene și internaționale din domeniul compatibilității electromagnetice au elaborat o serie de norme și standarde cu privire la emisiile radiative ale sistemelor de transport, emisii perturbatoare atât pentru mediul electromagnetic înconjurător, cât și pentru echipamentele sensibile de la bordul vehiculelor electrice. Nu trebuie pierdute din vedere nici normele și standardele elaborate pentru protecția călătorilor și a celor ce conduc astfel de vehicule.

Principalele standarde și norme europene în domeniul CEM a sistemelor de transport se referă la:

- Identificarea surselor de perturbații proprii sistemelor de transport
- Identificarea mecanismelor de cuplaj prin care aceste perturbații se regăsesc la nivelul eventualilor receptori
- Precizarea modului de măsură al emisiilor perturbative și a imunității sistemelor de transport în ansamblu și ale elementelor componente, respectiv ale subansamblurilor acestora
- Stabilirea domeniilor de frecvență și a limitelor perturbațiilor electromagnetice în sisteme de transport

Mai jos se vor prezenta date despre cele mai importante norme și standarde europene aflate în vigoare la momentul actual în domeniul transporturilor, cu accent pe cele referitoare la sistemele de tracțiune electrică.

### **9.4.1.Directiva Comunității Europene 95/54/EC**

În această directivă, Normele și reglementările cuprinse se referă la:

- Emisii radiative ale vehiculelor cu propulsie pe bază de motoare cu ardere internă
- Emisii radiative ale subansamblurilor electrice și electronice aflate la bordul vehiculelor cu propulsie pe bază de motoare cu ardere internă.

Prima categorie de norme cuprinde referiri la testele de efectuat asupra unui vehicul cu propulsie pe bază de motoare cu ardere internă pentru detectarea nivelului emisiilor radiative, în bandă largă și în bandă îngustă. Domeniul de frecvență de studiat este cuprins între 30MHz și 1 GHz. Condițiile în care trebuie să aibă loc măsurătorile sunt foarte clar specificate, și anume:



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Pentru vehicul în ansamblu:

- Acesta trebuie să fie situat într-o zonă de testare, la o distanță de 3m, respectiv de 10m față de antena de recepție;

- Motoarele trebuie turate la 1500 rot/min, pentru motoare în mai mulți cilindri și la 2500 rot/min. pentru motoarele într-un cilindru;

- Antenele utilizate sunt polarizate atât în plan orizontal cât și în plan vertical;

- Detectoarele aparatelor de măsură trebuie să fie detectoare de vârf sau de cuasivârf;

- Se consideră că vehiculul se încadrează în normele europene dacă emisiile sunt cu 2dB mai mici decât valorile din tabel;

- La măsurătorile în bandă îngustă, se procedează la un test inițial în domeniul 88MHz-108MHz și dacă rezultatele nu depășesc limitele impuse se consideră că vehiculul îndeplinește normele stabilite;

- Zgomotul de fond trebuie măsurat și înainte și după măsurarea emisiilor și trebuie să fie cu cel mult 10dB mai mic decât limitele impuse;

Pentru subansamblurile electrice și electronice aflate la bordul vehiculului:

- Subansamblul este în funcțiune, se alimentează de la sursă printr-o rețea artificială de  $5\mu\text{H} / 50 \Omega$  și este legat la pământ

- Distanța între subansamblu și antenă trebuie să fie de 1 m

- Se fac măsurători atât cu polarizare verticală, cât și cu polarizare orizontală

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

-Zgomotul de fond trebuie măsurat și înainte și după măsurarea emisiilor și trebuie să fie cu cel mult 10dB mai mic decât limitele impuse

-Pentru măsurătorile în banda îngustă se urmează același procedeu ca pentru vehicul în ansamblu.

În tabelele 9.1 respectiv 9.2, sunt date limitele pentru măsurători în bandă largă și în bandă îngustă pentru vehicule în ansamblu, respectiv pentru subansamblurile electrice și electronice ale acestora.

Tabel 9.1. Limitele pentru măsurători în bandă largă și în bandă îngustă pentru vehicule în ansamblu

<b>BANDĂ LARGĂ</b>	<b>BANDĂ ÎNGUSTĂ</b>
Testul cu antena la 10 m	

Domeniu de frecvență	Limite	Domeniu de frecvență	Limite
30MHz-75MHz (scade logaritmice)	34dB $\mu$ V/m	30MHz-75MHz (scade logaritmice)	24 dB $\mu$ V/m
75MHz-400MHz (creste logaritmice)	34-35dB $\mu$ V/m	75MHz-400MHz (creste logaritmice)	24-35 dB $\mu$ V/m
400MHz-1GHz	45 dB $\mu$ V/m	400MHz-1GHz	35 dB $\mu$ V/m
Testul cu antena la 3 m			
30MHz-75MHz (scade logaritmice)	44 dB $\mu$ V/m	30MHz-75MHz (scade logaritmice)	34 dB $\mu$ V/m
75MHz-400MHz (creste logaritmice)	44-45 dB $\mu$ V/m	75MHz-400MHz (creste logaritmice)	34-35 dB $\mu$ V/m
400MHz-1GHz	55 dB $\mu$ V/m	400MHz-1GHz	45 dB $\mu$ V/m

Tabel 9.2. Limitele pentru măsurători în bandă largă și în bandă îngustă pentru subansamblurile electrice și electronice ale vehiculelor

BANDĂ LARGĂ		BANDĂ ÎNGUSTĂ	
Domeniu de frecvență	Limite	Domeniu de frecvență	Limite
30MHz-75MHz (scade logaritmice)	64-54 dB $\mu$ V/m	30MHz-75MHz (scade logaritmice)	54-44 dB $\mu$ V/m
75Mhz-400MHz (crește logaritmice)	54-65 dB $\mu$ V/m	75Mhz-400MHz (crește logaritmice )	44-55 dB $\mu$ V/m
400MHz-1GHz	65 dB $\mu$ V/m	400MHz-1GHz	55 dB $\mu$ V/m

#### 9.4.2. Limite și metode de măsură ale perturbațiilor radio în vederea protejării receptorilor de pe vehicul. CISPR 25

Normele se referă la emisiile datorate motoarelor electrice și ale celor cu combustie internă care pot perturba receptorii proprii prin emisii radiative și conductive. Standardul acoperă banda de frecvență 150kHz-1GHz și stabilește:

- Metode de măsură ale emisiilor electromagnetice determinate de sistemele electrice ale vehiculului
- Modul de testare al componentelor și modulelor de pe vehicul
- Limite ale emisiilor electromagnetice pentru componente și sisteme electrice ale vehiculelor pentru a preveni perturbarea receptorilor la bord

Standardul se referă la următoarele tipuri de teste:

1. *Măsurarea emisiilor recepționate de o antenă aflată pe același vehicul.* Acest test are ca scop măsurarea emisiilor unui

vehicul cu o antenă instalată pe vehicul și verificarea încadrării în limitele impuse. Testele se efectuează pentru perturbații de lungă durată (aprindere, bătaia motorului, etc) și pentru scurtă durată (acționarea electrică a unui geam, a scaunelor, a pompei de apă,etc).

2. *Testarea componentelor și modulelor vehiculelor* . Acest test are ca scop măsurarea emisiilor intrasistem datorate echipamentului electric al vehiculului asupra sistemului de alimentare on-board, incluzând perturbațiile intrasistem ale rețelelor de cabluri și conductoare.

3. *Măsurători ale emisiilor radiative ale componentelor și modulelor de pe vehicule.*

Măsurătorile trebuie efectuate într-o încăpere ecranată pentru a elimina interferența cu perturbații exterioare. Lățimea de bandă utilizată este de 120kHz, antena este polarizată vertical (pentru frecvențe de până la 30MHz) și orizontal (pentru frecvențe peste 30MHz).

Echipamentul aflat în procedură de testare trebuie încărcat la o anumită sarcină astfel încât perturbațiile emise să fie maxime. Suprafața echipamentului care emite cea mai mare perturbație în radiofrecvență se situează cel mai aproape de antenă în timpul măsurătorilor.

Dacă această suprafață se modifică cu frecvența, măsurătorile vor fi efectuate și în planuri ortogonale. Limitele sunt prezentate în CISPR 25.

### **9.4.3. Interferențe radio datorate sistemelor de transport pe cale ferată. CISPR 26 1995.**

Aceste norme, se referă strict la sistemele de transport pe cale ferată și se referă la identificarea surselor de perturbații și mecanismelor de cuplaj în astfel de sisteme, prezentarea metodelor de testare și precizarea limitelor admise.

Testările se efectuează pentru o bandă de frecvență de 9kHz-300MHz pentru instalațiile mobile, respectiv 9kHz-30MHz pentru instalațiile fixe, inclusiv instalațiile de semnalizare și control ale traficului. Normele prevăd două categorii de teste :

- Teste staționare, la care antena este plasată la 10m de cel mai apropiat conductor al rețelei de tracțiune
- Teste în mișcare, cu antena fixată pe un vehicul care se deplasează odată cu vehiculul testat

Testele de măsură trebuie să respecte următoarele condiții:

- Aparatele și metodele utilizate trebuie să fie conforme cu normele CISPR 16-1
- Se utilizează ca receptor de măsură detectoare de vârf sau detectoare de cuasivârf
- Frecvențele alese trebuie să respecte precizările CISPR, iar pentru prototipuri trebuie determinată banda caracteristică de frecvență și nivelul maxim al perturbațiilor
- Frecvența de măsură depinde de locația testului. Trebuie identificate eventualele semnale radio, și în cazul în care există, trebuie modificată frecvența pe măsură. Pentru fiecare decadă se aleg 5 frecvențe de măsură în domeniul 9kHz-150kHz
- Viteza de deplasare a vehiculului în timpul testului și regimul de frânare recuperativă sunt precizate în EN50121

- Pentru măsurătorile staționare trebuie realizate cel puțin 6 măsurători la frecvențele nominalizate, una pentru fiecare trecere a vehiculului. Dacă o modificare a direcției de deplasare duce la rezultate diferite, citirile trebuie efectuate pentru direcția cu cele mai mari valori. În final se face media celor 6 măsurători.
- Limitele de protecție sunt precizate în funcție de sistemul de transport.

### **9.4.4. Aplicații în sistemele de transport pe cale ferată - compatibilitate electromagnetică. ENV 50121 1996.**

Pachetul de norme europene “Prestandarde în domeniul CEM pentru sistemele de transport pe cale ferată “ au fost elaborate în acord cu Directiva Europeană CEM 89/336. Acesta este format din 5 părți:

Normele specifice:

- Limitele emisiilor electromagnetice determinate de sistemele de transport în ansamblu, în conformitate cu Directiva 89/336
- Limitele emisiilor și ale imunității echipamentelor componente ale sistemelor de transport, limite care trebuie să fie compatibile cu cele ale sistemului în ansamblu
- Domeniul de frecvență acoperit: de la curent continuu la 400GHz, uzual până la 1GHz

*În prima parte*, standardul descrie comportamentul sistemului în ansamblu din punct de vedere al surselor de perturbații și eventualelor mecanisme de cuplaj.

*Partea a doua* se referă la emisii ale sistemului în ansamblu. Aceasta precizează :

- Limitele admise în domeniul radio
- Metodele de testare și informații cu privire la valorile tipice de câmp în domeniul 9kHz-1GHz
  - Metodele de măsură s-au preluat din CISPR 16-1
  - Se utilizează detectoare de vârf
  - Benzile de frecvență și lățimea de bandă sunt în concordanță cu CISPR16
- Se efectuează 5 măsurători pe decadă, pentru câmpul magnetic în domeniul 9KHz-30MHz și pentru câmpul electric în domeniul 30MHz-1GHz, cu o antenă situată la o distanță de 10m față de centrul căii de rulare (pentru câmpul electric măsurătorile se efectuează numai în plan orizontal)
- Testele trebuie să aibă loc la o viteză mai mare de 90% din viteza de lucru și pentru regimul de frânare recuperativă la o putere de frânare de cel puțin 80% din valoarea nominală

În figura 9.15 sunt prezentate limitele emisiilor pentru domeniul de frecvență precizat.

*Partea a treia* se referă la probleme CEM legate de aparatul rulant și de echipamentul electric și electronic al acestuia. Primul paragraf se referă la interferențele în domeniul liniilor analogice de comunicații. Nivelul emisiilor este prezentat în figura 9.16 pentru vehiculul staționar și pentru deplasare la viteză redusă (20km/h în mediul urban și 60km/h în exterior). Al doilea paragraf se referă la emisiile echipamentelor electrice și electronice aflate la bordul vehiculelor și la nivelul de imunitate al acestora relativ la perturbații conductive și radiative. Din această categorie se exclud disjunctorul, transformatorul și motorul/motoarele de tracțiune. Emisiile radiative se măsoară conform EN 55011, iar limitele corespund tabelului 9.3.

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

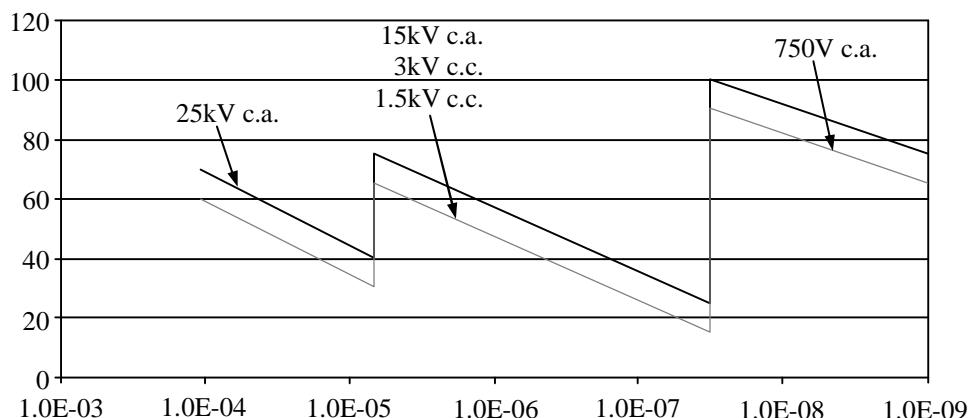


Figura 9.15 Limitele emisiilor pentru domeniul de frecvență precizat

Tabel 9.3. Limitele emisiilor radiative ale echipamentelor electrice și electronice de pe vehicule în sisteme de transport feroviar

Domeniul de frecvență	Limite
30MHz-230 MHz	40 dBμV/m Qp măsurat la 10 m
230 MHz-1GHz	47 dBμV/m Qp măsurat la 10 m

*Partea a patra* precizează metode de testare (conform EN 55 022) și limitele admise pentru emisiile și imunitatea sistemelor de semnalizare și control ale traficului. Limitele și domeniile de frecvență corespund tabelului 9.3.

*Partea a cincea* este destinată emisiilor și imunității instalațiilor fixe și elementelor lor componente. Acestea includ rețeaua de cabluri de alimentare a aparatelor și echipamentului electric, fiderii de alimentare ai liniei/șinei de contact, transformatoarele de putere, fiderii de întoarcere, transformatoarele de compensare.



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

Limitele admise pentru substații sunt date în tabelul 9.4. Pentru măsurători peste 30MHz, se evaluează măsurători numai în plan vertical.

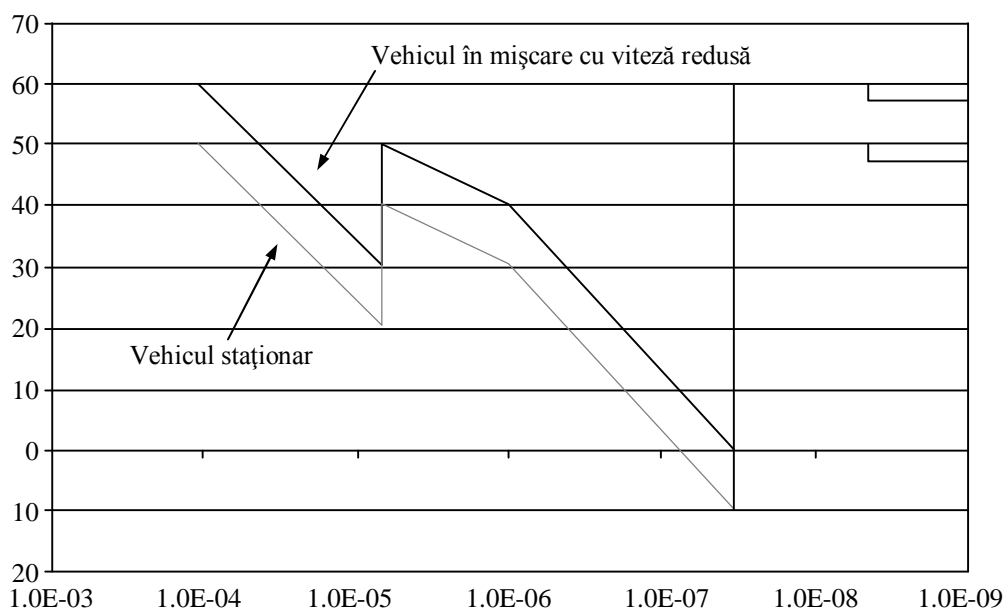


Figura 9.16. Limitele emisiilor aparatului rulant pentru domeniul de frecvență precizat

Tabel 9.4. Limitele emisiilor radiative ale substațiilor de tracțiune în sisteme de transport feroviar

Domniul de frecvență	Limite
9 kHz	55 dBμ V/m QP măsurat la 3m
≤ 150 kHz	45 dBμ V/m QP măsurat la 3m
>150 kHz	50 dBμ V/m QP măsurat la 3m
≤ 30 MHz	20 dBμ V/m QP măsurat la 3m
> 30MHz	55 dBμ V/m QP măsurat la 3m
1 GHz	35 dBμ V/m QP măsurat la 3m

Măsurătorile se efectuează la 3 m de la gardul stației, sau dacă nu există un gard, la 10 m de aparat. Pentru fiderii de alimentare limitele sunt corespunzătoare celor din tabelul 9.3.

Pentru aparate îngropate, măsurătorile se efectuează la suprafața pământului, deasupra aparatului, pentru domeniul 9kHz - 150kHz și cu limitele corespunzătoare tabelului 9.4.

### 9.4.5 Perspective

În ceea ce privește domeniul de frecvență, standardele și reglementările curente se bazează pe CISPR 12, care specifică măsurători în domeniul 30MHz - 1GHz. Reglementări specifice, precum ENV 50121, propune măsurători între 9kHz și 1GHz, cu precizarea că, pentru câmpurile magnetice, domeniul de măsură este 9 kHz - 30MHz.

Actualmente, se discută extinderea domeniului până la 18 GHz și chiar mai sus, până la 400GHz. Acest lucru este susținut de numărul în continuă creștere al surselor de perturbații și de frecvențele de lucru tot mai înalte de operare ale acestora, de cele mai multe ori dincolo de limitele actuale.

În vederea extinderii domeniului de frecvență atât pentru măsurători ale emisiilor perturbative cât și pentru testarea imunității trebuie luate în considerare următoarele :

- Numărul de frecvențe la care trebuie efectuate măsurătorile
- Creșterea prețului echipamentului de testare odată cu extinderea domeniului de frecvență de lucru al posibilelor surse sau receptori de perturbații
- Performanțele echipamentului de testare

Stabilirea limitelor admise prin standardele curenți se bazează pe CISPR12. Acestea sunt fixe la frecvențe între 30-75 MHz și cresc logaritmice pentru valori ale frecvențelor până la 400MHz. Reglementările în vigoare stabilesc de asemenea și nivelele pentru bandă îngustă, respectiv pentru bandă largă. Rezultatele testelor propuse de CISPR12 pot fi descrise prin valoare medie, de vârf sau de cvasivârf. Este foarte important ca aceste măsurători să urmărească îndeaproape tendințele din domeniul radiocomunicațiilor și să se ia în considerare extinderea utilizării circuitelor digitale, mai sensibile la pante de variație mari, ceea ce presupune utilizarea detectoarelor de valoare de vârf ca receptor de măsură.

Ca aparate de măsură se utilizează receptoare de măsură și analizoare de spectru. Receptoarele de măsură oferă rezultate mai precise, dar timpul de măsură este cu atât mai mare cu cât numărul de frecvențe predeterminate a fi testate este mai mare. Pe de altă parte, analizoarele spectrale baleiază o bandă mai largă de frecvențe, dar cu precizie mai mică decât cea a receptoarelor. Reducerea lățimii de bandă și efectuarea de măsurători în trepte ar putea compensa acest dezavantaj.

Pentru sistemele de transport, spațiul de testare a vehiculului trebuie să se întindă pe o rază de 30m, fără suprafețe de reflexie. Pentru subansamble raza de acțiune scade la 15m. Măsurătorile se pot efectua și în camere anecoice, costul unor astfel de sisteme de testare fiind însă mult mai mare.

Antenele de recepție pentru măsurători trebuie instalate la o distanță de 3, respectiv 10m față de vehiculul aflat sub testări. Trebuie luat în considerare și unghiul de deschidere al antenei, mai ales la vehicule mari. Este necesară efectuarea de măsurători

în diferite puncte din jurul vehiculului pentru a acoperi întregul domeniu.

În perspectivă, pentru dezvoltarea standardelor și reglementărilor europene în domeniul CEM pentru sisteme de transport, trebuie luat în considerare impactul introducerii motoarelor electrice și al sistemelor hibride la propulsia vehiculelor asupra creșterii semnificative a perturbațiilor în domeniul radio. Un alt factor important este echiparea vehiculelor rutiere cu sisteme electronice și informatice de securitate, cum ar fi sistemele de evitare a coliziunii, cele pentru protecția pasagerilor și a pietonilor. Toate acestea vor determina stabilirea unor noi norme și standarde care să protejeze cât mai bine circuitele și echipamentele electrice aflate în vecinătate și deasemenea mediul biologic aflat în pericol.

## **BIBLIOGRAFIE**

1. ABRHAM,L., *Power electronics in German railway propulsion*, Proceedings of the IEEE, 76(1988),4,472-480.
2. BACHLER,U.,HULLER,B., *Équipements de véhicules pour le trafic urbain et métropolitain fort demandés sur le marché d`exportation*, Revue Brown Boveri, 71 (1984), 12, 587-600.
3. BAEGGLY.H.H., ș.a. *DC Chopper control with automatic field weakeing and combined recuperation / resistor break for DC urban trasit vehicles*, IEEE, Indusly Applications Society Conference Record, Troronto, 1978,pp, 729-748
4. BARWELL, F.T., *The development of high-speed ground transport*, Electric Vehicle Developments, 6 (1987), 1, 17-21 și 32.
5. BENDEL, E., sa *Elektrische Triebfahrzeuge*, VEB Verlag fur Verkehrswesen, Berlin, 1981
6. BEZOLD, K.–H.. ș.a. *Anwendung von GTO – Thyristoren auf elektrischen Trieb fahrzeugen*, E elektrische B ahnen, 84 (1986), 11, 333-342
7. Boglietti A., Carpaneto E.: „*An accurate induction Motor High-frequency model for electromagnetic compatibility analisys*”, Electric Power Components and Systems, Taylor&Francis, 2001,pp.191-209
8. BOLDEA, I., *Vehicule pe pernă magnetică*, Ed. Academiei, București, 1981.
9. BOLDEA, I., ș.a., *Magnibus-the Romanian linear inductor (synchronous) motor (passive guideway) maglev*,

- Proceedings of the International Conference on Maglev Transport, Solihull, 1984, pp. 149-154.
10. BOLDEA I. NASAR, S.A., *Electric machine dynamics*, Mcmilan Publ. Co. New York, 1986.
  11. BUCURENCIU, S., *Tracțiune electrică*, vol.I,I.P. București, 1984.
  12. Burbuduș F.: “*Construcția și proiectarea vehiculelor de tracțiune cu motoare electrice* “ , Reprografia Universității din Craiova, 1998.
  13. Busse D., Erdmann J., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G.: „*The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings*”, APEC Conference, San Jose, Ca, 1996
  14. Cacciato M., Consoli A., Scarcella G., Testa A.: „*Effects of PWM Techniques on Common Mode Currents in Induction Motor Drives*”, Proc. Of the IEEE International Symposium of Industrial Electronics, Guimaraes (Portugalia), 1997, pp. 212-217.
  15. Cacciato M., Consoli A., Gennaro F., Scarcella G., Testa A.: „*High Frequency Phenomena in Electrical Drives Part II: Influence of Pulsewidth Modulation*”, IEEE SDEMPED 99, Gijon (Spania), 1999, pp.75-80.
  16. Cahn C.C. *The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles*, Proceedings of the IEEE, vol.90 No.2, February 2002, pp.247-275
  17. CALVINEN, J. *Three phase AC tractiondrives: design and service experience*, IEE proceedings, 134 (1987) pt.b.3 1945/1940

- 18.CANTEMIR L.,OPRIȘOR, M., *Tracțiune electrică*, E.T.P., București 1971
- 19.Cantemir, L., ș.a., VEMLI-03-*Vehicul acționat cu motor liniar bilateral de inducție*, Conferința Națională de Electrotehnică și Electroenergetică, Craiova, 1984, vol.6-*Tracțiune electrică și echipamente neconvenționale*, pp. 43-48.
- 20.CARBONARI, N., ș.a., *Calculation of levitation, drag and lateral forces in EDS- maglev transport systems*, Archiv für Elektrotechnik, 71 (1988), 2 139-148.
- 21.CĂLIN, S., *Regulatoare automate*, E.D.P., București, 1976.
- 22.Charoy A.: „*Compatibilite Electromagnetique*” Ed. DUNOD, Paris, 2001.
- 23.CONDACSE, N., *Locomotive și trenuri electrice*, E.D.P., București, 1980.
- 24.Consoli A., Oriti G., Testa A., Julian L.A.: „*Induction Motor Modelling for Common Mode and Differential Mode Emissions Evaluation*”, IEEE Industry Application Society Annual Meeting San Diego (USA), 1996, pp. 595-599
- 25.De Wispelaere J.: „*Electromagnetische Compatibiliteit*”, note de curs, KAHO, St. Lieven, Gent, Belgia, 1997.
- 26.De Vre R., Dussart M.: „*Influence des Charges domestiques sur la qualite de la tension du reseau*”, Revue Electronique de puissance, no. 1, 1996, pp. 7-12
- 27.DONONCIN. L., T. *The experiment ACEC / MIVA*, Proceedings of the unst European conference on power



- electronics and applications, Bruxelles, 1985, vol.2 pp 5.89-5.93.
- 28.DRAGOMIR., T.-L., *Sisteme cu mașini electrice cu levitație electromagnetă*, Teză de doctorat, I.P. Timișoara, 1982.
- 29.EASTHAM, A.R., HAYES., W.F., *The status of development of maglev system*, 37 th IEEE Vehicle Technology Conference, Tampa, 1987, pp. 231-239.
- 30.Furnică E., Leonte P.: *“Fabricarea și construcția aparatelor electrice”*, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi”, Iasi, 2001.
- 31.Gao. Y., Ehsani M. *Hybrid Electric Vehicle: Overview and State of the Art*, IEEE ISIE 2005, June20-23, 2005, Dubrovnik, Croatia
- 32.GATHMANN H. ș.a. *Übersicht über die junxten Entwicklungen der Drehstromantriebs Technik bei elektrischen Bahnen*, Elektrischen Bahnen 89-(1988), 1,22/39
- 33.Georgescu,M., *Tractiunea electrica de mare viteza, cu motoare sincrone*, Ed.Dacia, 2001
- 34.GOTHIERE J., HOLOGNE, H., *Les hahcheurs a thyristors e traction electrique*, Revue ACEC, 1976, 1/2 3/22
- 35.GOTTZEIN, E., ROGG, D., *Status of high speed maglev train development in the FRG*, Proceedings of the International Conference on Maglev Transport, Solihull, 1984, pp.23-36.
- 36.Grandi G.: *“Influence of switch characteristics on conducted differential-mode interferences in power*

- electronic converters*”, DIE Internal Report, Univeristy of Bologna, Italia, 1996.
- 37.Hill R.J.: „*Electric railway traction. Part 7.Electromagnetic Interference in traction systems*”. *IEEE Power Engineering Journal*, 1997, December, 259-266.
- 38.Husain I. *Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals*, CRC Press, 2003
- 39.IANCU,V.,Radulescu,M.,Papusoiu,G. *Tractiune Electrica*, IP Cluj Napoca, 1989
- 40.JUNCU, M., *Vehicul pentru transport urban acționat cu motoare liniare*, Conferința Națională de Electrotehnică și Electromagnetică Craiova, 1984, vol.6- Tracțiune electrică și echipamente neconvenționale, pp. 103-109.
- 41.JUNCU, M., ș.a, *Ramă de metrou acționată cu motoare asincrome rotative*, E.E.A. – electrotehnica, 36(1988), 1,1-5
- 42.KAWAHIRA, K.,ș.a. *AC motore drive system for electircal vehicles*, tischiba review (1989) 14-19
- 43.Krah J.O., Holty J.: „*Total compensation of line-side switching harmonics in converter-fed AC locomotives*” , *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.31, No.6 1995, pp.1264-1273
- 44.KYOTANI,Z., TANAKA, H., *Present status of JNR maglev development*, Proceedings of the international Conference on Maglev and Linear drives, Vancouver, 1986, pp. 41-45.
- 45.Livinț, Gheorghe., șa *Vehicule electrice hibride*, Ed. Venus, Iași, 2006

46. Martiș, Claudia. Steluța., *Compatibilitate electromagnetica in sisteme electromecanice*, Ed Mediamira, Cluj Napoca, 2004
47. MIHAILESCU, D., ILIE, A., *Consideratii privind functionarea vehiculelor feroviarecu transmisie in curent alternativ si motoare asincrone de tractiune*, Revista transporturilor si telecomunicatiilor 11(1984), 1, 5-16
48. Muc A.M.: „*Electromagnetic fields associated with transportation systems*”, Radiation health and safety consulting, report, Toronto, Canada, 2001.
49. Munteanu,R.,Dragomir,N.,Tarnovan,I.,Popovici,O.,  
*Electrotehnica si convertoare energetice*, Ed Mediamira, Cluj Napoca, 1997
50. NASAR, S.A., BOLDEA, I., *Linear electric motors: theory, design and practical applications*, Pretice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
51. Nicola,D.A.,Cismaru,D.C., *Tractiunea electrica-fenomene, modele, solutii*, Ed. Sitech, 2006
52. ONEA, R.,SIMION, V., *Utilajul si tehnologia instalatiilor fixe de tractiune electrica*, EDP Bucuresti, 1978
53. POPA, AL., *Locomotive si automotoare cu motoare termice*, EDP Bucuresti, 1978
54. Popovici,O., *Instalatii electrice industriale*, Ed Mediamira, Cluj Napoca, 2003
55. RACOVEANU, N., *Automatica*, Ed. Militară, București, 1980.
56. RADOI, A., *Electromobilul*, Ed.Tehnica, Bucuresti, 1981

- 57.ROGG, D., *General survey of the possible applications and development tendencies of the magnetic levitation technology*, IEEE Transactions on Magnetics, 20 (1984), 5, 1672-1674.
- 58.Ryan N.J., Stone D.A., Chambers B., Cudd P.A.,: „*Electromagnetic Compatibility of Electrical Machines and Drive Systems*”, Proc. 30th Universities Power Engineering Conference, 1995, pp.141-144.
- 59.Ryan N.J., Stone D. A., Cudd P. A., Chambers B., Howe D.: „*Electromagnetic compatibility of DC machines and drive systems*”, 2nd Chinese ICEM, 1995, pp.134-138
- 60.SALZGEBER, B., *Sous-station de redresseur pour la traction*, Revue Brown Boveri, 61(1874), 11, 501-507
- 61.SCHMIDT, P., *Beeinflussung durch Elektrische Bahnen*, 42(1986),1,11-14
- 62.Schwab A. J.: „*Compatibilitate Electromagnetică*”, Editura Tehnică București, 1996.
- 63.SINHA, P.K., *Some structural properties of the electromagnetic suspension system*, Proceedings of the International conference on Maglev and Linear Drives, Vancouver, 1986, pp. 101-106.
- 64.TĂNĂSESCU, F.T., *Electronica de putere pe locomotiva romaneasca*, EEA Electrotehnica, 33(1985), 352-361
- 65.UNTARU, N., sa, *Dinamica autovehiculelor pe roti*, EDP Bucuresti, 1981
- 66.VĂZDAUȚEANU, V., *Tractiune electrica*, I.P.Timisoara, 1984

67. Westbrook H.M. *The Electric Car. Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars*, The Institution of Electrical Engineers, 2005
68. Weber St. P., Gutowski S., Hoene E., John W., Reichl H.: „*IEC Electromagnetic Compatibility Standards*”, Darnell Group Inc. 2001.
69. Weber St. P., Gutowski S., Hoene E., John W., Reichl H.: „*Guide to Harmonics with AC drives*”, ABB Technical Guide nr.6, Helsinki, 2000.
70. Zeraoulia M. Benbouzid M.E.H., Dialo, D. *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: a Comparative Study*, IEEE 2005, 0-7803-9280-9/05, pp. 280-287
71. \*\*\* *Echipamente electrice pentru substatii de tractiune*, Electroputere, 1984
72. <http://www.clean-auto.com>

## **ANEXE**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

### ANEXA 1 – Locomotive și trenuri electrice



**Locomotiva Siemens – Transport marfă urban**



**Locomotiva românească 5100 kW – Electroputere Craiova**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**Locomotiva diesel-electrică Electroputere**



**Trenul de mare viteză Eurostar**



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**Trenul de mare viteză- Taiwan**



**Trenul de mare viteză ICE3 - Germania**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**Trenul de mare viteză – Japonia**



**TGV – Franța – Sisteme de sustentație ale liniei de contact**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**TGV SUD – Franța**



**TGV – Rhine Rhone – Franța**



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

### ANEXA 2 – Vehicule electrice transport urban călători



**Tramvai electric Iași**



**Tramvai electric românesc – Timiș**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**Tramvai – Franța**



**Tramvai electric cu podea joasă – București**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ



**Troleibus**



**Metrou automat – Portugalia**



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

### ANEXA 3 – Vehicule pe pernă magnetică MAGLEV



**Maglev Japonia**



**Maglev Shanghai**

## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

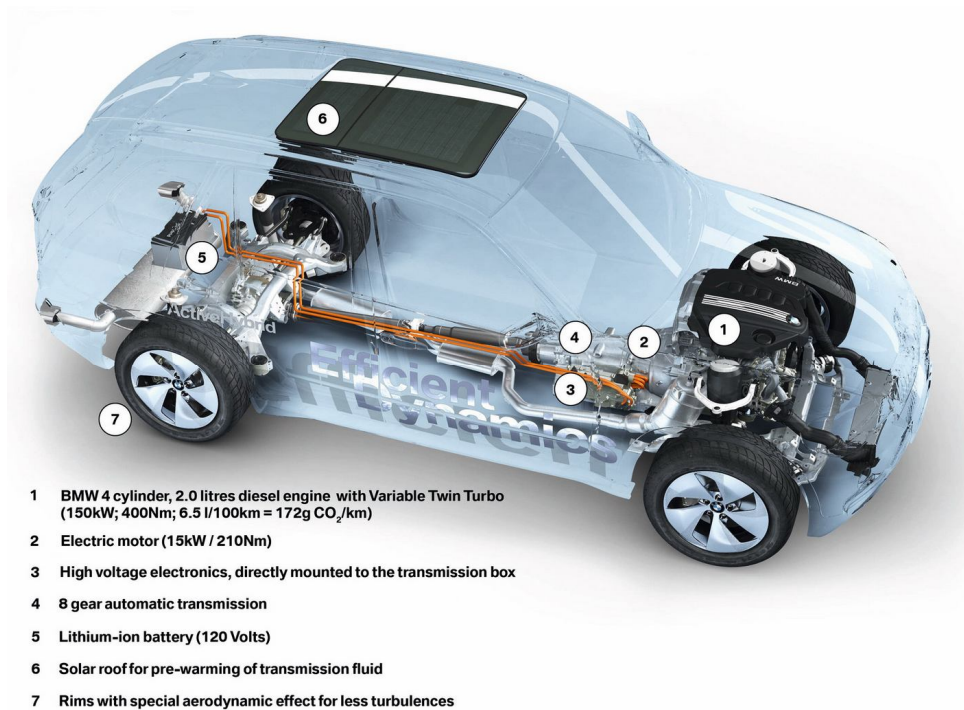
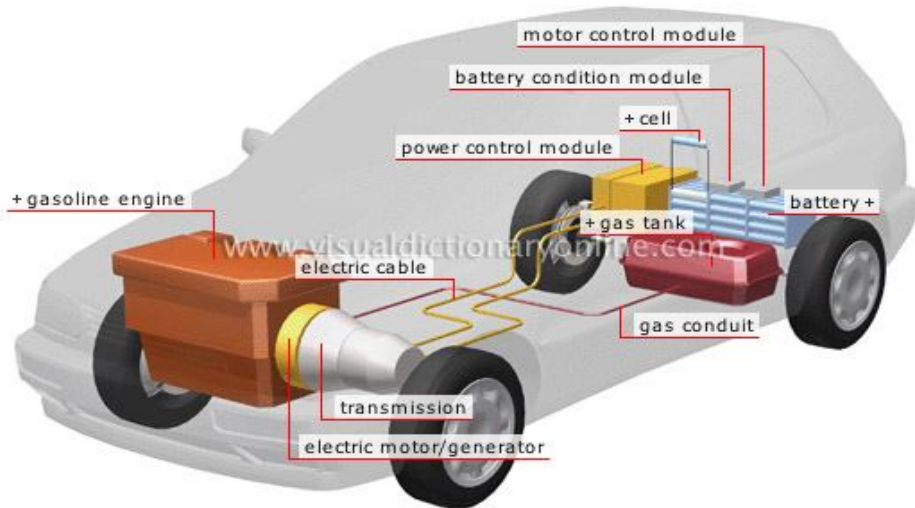
### ANEXA 4 – Tracțiune electrică pe cablu - Teleferice





# TRACȚIUNE ELECTRICĂ

## ANEXA 5 – Vehicule electrice hibride



## TRACȚIUNE ELECTRICĂ

